Hans Joachim Strüber

Untersuchungen zur Farbentheorie

1966

8672

1964

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41547602_0027

UNTERSUCHUNGEN ZUR FARBENTHEORIE

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung des Doktorgrades

einer

Hohen Philosophischen Fakultät

der

Eberhard-Karls-Universität

zu Tübingen

vorgelegt

von

Hans Joachim Strüber

aus

Mexico / D.F.

1966

Gedruckt mit Genehmigung der
Philosophischen Fakultät der Universität Tübingen

Hauptberichterstatter: Professor Dr. Wilhelm Witte

Mitberichterstatter : Dozent Dr. Ludwig Scheglmann

Dekan : Professor Dr. Herbert Wilhelmy

Tag der mündlichen Prüfung : 27. Februar 1964

UNIVERSITEITSBIBLIOTHEEK - LEIDEN -

Phototechnische Zentralstelle
der Westfälischen Wilhelms-Universität zu Münster/Westf.

I N H A L T

	Seite
Vorbemerkungen	I
I. Über die Gesetzmäßigkeit der Beziehungen zwischen Farbreiz und Farbwahrnehmung	1
1. Die Untersuchungen von Edwin H. LAND	2
a) Die Farbenmischgesetze in der farbigen Photographie	2
b) Die Entdeckung eines Phänomens	3
c) Ein neues System von Farborten	5
d) Systematische Veränderung der Reizlichter	8
e) Invarianz der Farborte	12
f) Verschiedene Reizkonfigurationen	16
g) Gleichzeitig gegebene Farbwelten	22
2. Ansätze zu Erklärungen durch Zusatzhypothesen	23
a) Kontrast	23
b) Adaptation	29
3. Durch LANDs Untersuchungen entstandene Probleme	31
a) Beziehungen zu den Farbmischregeln	32
b) Durch das Wahrnehmungsfeld gesetzte Bedingungen	34
c) Zusammenfassung und Fragen	39
II. Die theoretischen Grundlagen der Farbenmischung	42
1. NEWTONs Schwerpunktkonstruktion	42
2. Die GRASSMANNschen Gesetze	50

3. Die Grundlagen des Dreifarbensatzes 59
a) Historische Entwicklung 59
b) Moderne Fassungen der GRASSMANNschen Gesetze und der Dreifarbensatz 64

Zusammenfassung 69

III. Die Farbenmischungen in einzelnen Sachgebieten 71

1. Physik 72
2. Photometrie 73
3. Kolorimetrie 78
4. Physiologie und Theorien des Farbensehens 86
5. Psychologie 94

Zusammenfassung 101

Schlußbetrachtungen 103

Literaturverzeichnis 109

Vorbemerkungen

Diese Untersuchungen über Farben haben ihr Motiv und ihren sachlichen Ausgangspunkt in der Beschäftigung mit einem Phänomen, das der amerikanische Physiker und bedeutende Erfinder E.H. LAND vor einigen Jahren beschrieben hat. Das Erregende an diesem Phänomen war, daß Farben wahrgenommen wurden, für die jede Reizgrundlage zu fehlen schien. Das Interesse des Verf. richtete sich zunächst auf die Möglichkeit, diese besonderen Umstände für einen neuen experimentellen Zugang zu einigen speziellen psychologischen Fragen nutzbar zu machen. Es war aber auch nötig, den Ort anzugeben, an dem das eigentlich Unerwartete anfing und welchen Erwartungen es im Einzelnen widersprach.

Der Widerspruch zu den auf physikalisch definierten Reizen aufgebauten Erwartungen schien zunächst durch sehr naheliegende Zusatzannahmen überbrückbar. Es zeigte sich aber fortschreitend, daß so gut wie alle Vermutungen in dieser Richtung nicht zutrafen.

Dies führte auf die ganz andere Frage, wie unsere Vorstellungen über die notwendigen Reizbedingungen für bestimmte Wahrnehmungen überhaupt begründet sind. Erst damit war das eigentliche Gebiet der traditionellen Farbentheorie und der Gesetze der Farbenmischung im Besonderen zum Gegenstand geworden. Die Ergebnisse, zu denen der Verf. bei diesen Untersuchungen gekommen ist, lassen sich vollständig von der ursprünglichen Absicht lösen; denn man hätte von sehr vielen anderen Problemen ausgehend den gleichen Weg gehen können.

Andererseits ist das LANDsche Phänomen tatsächlich auch unter dem verwandelten Gesichtspunkt ein wichtiges Problem und wahrscheinlich war es für die ganze Untersuchung heuristisch gesehen wirksam. Aus diesem Grunde nimmt seine Darstellung einen erheblichen Teil dieser Arbeit ein. Die Fragen, die es stellt, sind aber an keiner Stelle auf die anderen Probleme der Farbenlehre übertragen worden. Es müßte mehr über

die eigentümlichen Bedingungen dieses Phänomens berichtet werden können, um gezielte Fragen an die Grundlagen unseres gegenwärtigen Wissens daraus zu entwickeln.

Es werden also aus zwei verschiedenen Quellen vorerst unterschiedliche Fragen gewonnen, über deren Vereinigung oder prinzipielle Trennung nur vollständigeres Wissen entscheiden kann.

Zu Verfahrensfragen ist anzumerken: Es ist nur solche Literatur angegeben, aus der zitiert wurde oder der Einzeldaten entnommen wurden. Sobald etwas als allgemeineres Wissensgut bezeichnet werden konnte, wurde auf Quellenangaben verzichtet. Zitate aus fremdsprachlicher Literatur sind sämtlich vom Verf. übersetzt. Altertümliche Orthographie in einigen Texten wurde in die heute übliche Rechtschreibung übertragen.

Mein verehrter Lehrer, Professor Dr. Wilhelm Witte, hat mich aus Fürsorge und besserem Wissen um die Schwierigkeiten auf diesem Gebiet gewarnt, es zu betreten. Ich glaube heute das Gewicht dieser Warnung ermessen zu können. Sollte Herr Professor Dr. Witte wenigstens in der Absicht dieser Untersuchung den Schüler erkennen, so wüßte ich mich auf dem Wege, den ich vor vielen Jahren mich entschloß zu gehen.

I. Über die Gesetzmäßigkeit der Beziehungen zwischen Farbreiz und Farbwahrnehmung

In jedem Sinnesgebiet hat die Beziehung zwischen Reiz und Erlebnis ihre Probleme. Meist läßt sich aber eine einfache Situation isolieren, die es erlaubt, eine "Normalzuordnung" einer Dimension des Reizes und einer solchen der Empfindung festzulegen. So läßt sich in der Akustik den Schwingungsfrequenzen von Luftdruckwellen eindeutig und vollständig die Reihe der Tonhöhenerlebnisse zuordnen.

Die Menge der Farbwahrnehmungen läßt sich zu keiner einzelnen physikalisch definierbaren Dimension vollständig in Beziehung setzen. Die meisten Farberlebnisse werden durch ein Gemisch einzelner physikalischer Größen hervorgerufen. Wir wissen aber, wie man durch Mischung für jedes beliebige Farberlebnis den richtigen Reiz bekommt. Dieses Wissen drücken die Gesetze der Farbenmischung aus.

Ihre Unentbehrlichkeit und ihre faszinierende Rationalität haben sie zum Kern fast jeder modernen Bemühung im praktischen und theoretischen Bereich der Farbenlehre gemacht. Sicherlich wären unsere Vorstellungen über das Farbensehen sehr ungenügend und chaotisch, wenn wir kein rationales Verhalten des Farbreizes definieren könnten. Allerdings geraten diese Definitionen an einigen Stellen sowohl mit theoretischen als auch empirischen Gegebenheiten in Widersprüche.

Diese Untersuchung möchte von einem jüngst bekannt gewordenen Phänomen, das diese Schwierigkeiten in besonderer Häufung zutagetreten läßt, ausgehen, um die Wurzel einiger Definitionen aufzusuchen, mit denen wir unser Verständnis des Farbensehens wahrscheinlich unnötig belasten.

Das eben erwähnte Phänomen ist von Edwin H. LAND im Jahre 1959 zuerst beschrieben worden. Seine Untersuchungen

bestehen in einer Reihe von etwa dreißig Versuchen. Da LAND im wesentlichen tatsächlich nur beschreibt, was unter gewissen Versuchsbedingungen geschieht, ohne dabei die berührten Fragen und Probleme theoretischer Natur überhaupt auszusprechen, ist es sehr mühsam, eine Auswahl und ein Auseinanderlegen der Bedeutung einzelner Versuche zu geben. Dies geschieht im ersten Abschnitt dieses Kapitels.

Im zweiten Abschnitt werden einige Erklärungsversuche diskutiert, die als erste Resonanz auf LANDs Veröffentlichungen lautgeworden sind. Wenn sie nach Meinung des Verfassers der Sache nicht gerecht werden, so liegt dies z.T. an der erwähnten Mühsal, die der Autor seinen Lesern auferlegt, indem er nicht allein auf Interpretationen verzichtet, sondern dem Leser auch zumutet, den theoretischen Stellenwert und die Fragestellung für jeden Versuch zu erschließen.

Im dritten Abschnitt soll durch einen Vergleich des LANDschen Phänomens mit den Farbenmischungen die Frage für die folgenden theoretischen Untersuchungen formuliert werden.

1. Die Untersuchungen von Edwin H. LAND

a) Die Farbenmischgesetze in der farbigen Photographie

Da die Befunde von LAND sich an Versuche zur Farbphotographie anschließen, muß die Rolle der Farbmischgesetze für diese umrissen werden. Es ergibt sich dann ohne weiteres das Problem, welches die abweichenden Phänomene aufwerfen.

Das farbige Photographieren wäre sehr kompliziert, wenn man für jede Farbe eine besondere Variable, also einen besonderen Film oder eine photosensible Schicht brauchte. Man macht hier aber von dem Umstand Gebrauch, daß sich aus drei geschickt gewählten Farben die übrigen durch Mischung hinreichend gut zusammensetzen lassen. An jeder Stelle eines Bildes müssen dann die drei Ausgangsfarben in einem bestimmten Mengenverhältnis vertreten sein.

Wie man dies technisch erreicht, läßt sich am besten an Hand

eines Versuches zeigen, der auf den englischen Physiker Cl. MAXWELL zurückgeht: Man nimmt die gleiche Szenerie dreimal mit gewöhnlichem Schwarzweiß-Film photographisch auf, wobei jedes Bild durch einen farbigen Filter belichtet wird. Diese Filter sind etwa so beschaffen, daß der eine bevorzugt rotes Licht (Rotfilter), der andere grünes (Grünfilter) und der dritte blaues Licht (Blaufilter) durchläßt.

Hierdurch erreicht man, daß auf jeder der drei Schwarzweiß-Aufnahmen die von den farbigen Gegenständen ausgesandten Lichter in unterschiedlichem Ausmaß zur Belichtung des Filmes beitragen. Auf dem einen Bild wirkt ein roter Gegenstand deswegen heller als auf dem anderen, und das gleiche gilt für grüne und blaue auf den übrigen Bildern.

Für Diapositive gilt dann, daß jedes an jeder Stelle eine andere Lichtdurchlässigkeit hat. Projiziert man nun mit drei farbigen Lichtern aus drei Projektoren diese Aufnahmen der gleichen Szene übereinander, so sind die farbigen Projektionslichter auf der Leinwand für jede Bildstelle in einem anderen Verhältnis gemischt. Benutzt man zur Projektion diejenigen Lichter, die von den Aufnahmefiltern durchgelassen werden, so ergibt sich, daß das Gemisch dieser Lichter für jeden Gegenstand die natürliche Farbe wiedergibt. Das beschriebene Verfahren ist also eine Anwendung des Fundamentalsatzes der Farbenmischung, nach dem sich jede Farbe durch ein Gemisch von drei Ausgangsfarben darstellen läßt.

b) Die Entdeckung eines Phänomens

Bei der Wiederholung des Versuches von MAXWELL stellte LAND zunächst fest, daß sich an der Farbigkeit eines in der beschriebenen Weise projizierten Bildes wenig ändert, wenn man einen Projektor ausschaltet. Man entzieht dadurch dem Bild auf der Leinwand eine Farbkomponente. Löscht man den mit blauem Licht projizierenden Apparat, so sollte man erwarten, daß alle blauen oder blauähnlichen Areale des Bildes ihre Farbe verlören; denn mit dem verbleibenden roten und grünen

Licht läßt sich Blau nicht durch Mischung herstellen.

Man kann die Projektionsbedingungen aber noch wesentlich weiter reduzieren, indem man nur noch ein Bild mit farbigem Licht und das zweite mit weißem projiziert. Auch in diesem Fall bleibt das Bild bunt. Als Farbenmischung betrachtet, stellt dieses Ergebnis einen Widerspruch zu den Erwartungen dar; denn mischt man ein beliebiges farbiges Licht mit weißem in allen Intensitätsverhältnissen, so erwartet man als Wahrnehmung diese gleiche Farbe in allen Graden von Aufhellung oder Verweißlichung, aber keine neuen Farbtöne.

Die Untersuchungen von LAND gehen wohl auf einen Zufallsbefund zurück. Wie sich später herausstellte, waren Erscheinungen ähnlicher Art schon bekannt. Im Bereich der Farbenkinematographie existiert sogar ein Patent aus dem Jahre 1914, das auf der technischen Verwirklichung eines ähnlichen Phänomens beruht. Trotzdem gebührt LAND das Verdienst, diese Dinge durch systematische Experimente näher fixiert und der Wissenschaft zugänglich gemacht zu haben.

Es scheint eigentümlich, daß auf einem so alten Forschungsgebiet, wie es die Farbphänomenologie ist, nicht schon vorher Ähnliches beschrieben worden ist. Sicher ist es kein Zufall, daß es erst im Zusammenhang mit der Farbphotographie geschah. Beim Aufnehmen farbiger Bilder entstehen gewissermaßen von selbst sehr komplexe Anordnungen, während man in gezielten Experimenten meist bis zum äußersten vereinfacht. LAND behauptet, daß die beschriebenen Phänomene nicht eine unerhebliche Abweichung von den klassischen Theorien, sondern ein wesentliches Problem für diese darstellen. Außerdem betont er, daß solche Erscheinungen vor allen Dingen beim Sehen "natürlicher Bilder" eine gewichtige Rolle spielten, wogegen die Gesetze der Farbenmischung nur einen besonderen Fall des Farbensehens berührten.

LAND unterzieht diese Fragen keiner weiteren Erörterung. Lediglich in einer Fußnote findet man die nicht besonders aufschlußreiche Anmerkung, daß die beschriebenen Erscheinungen

keineswegs auf "farbige Schatten", "chromatische Adaptation" oder "sukzessiven Kontrast" zurückzuführen seien.

c) Ein neues System von Farborten

Versuchsgegenstand waren in sämtlichen Untersuchungen von LAND Photographien farbiger Stilleben. Diese waren mit einer besonderen Doppelkamera, die es erlaubte, mit einer Objektivöffnung zur gleichen Zeit zwei Filme zu belichten, aufgenommen worden. Der Strahlengang für die eine Aufnahme passierte einen grünen Filter, wodurch die kurzwelligen Lichter des Spektrums bevorzugt zur Belichtung beitrugen ("kurzwelliges Bild"), der für die andere einen roten, wodurch die langwelligen Lichter bevorzugt zur Belichtung beitrugen ("langwelliges Bild"). Diese bis auf eine verschiedene Lichtdurchlässigkeit an jedem Punkt identischen Aufnahmen werden entweder durch einen Doppelprojektor über zwei Strahlengänge projiziert oder in einem "Guckkasten" beleuchtet und dekkungsgleich übereinandergespiegelt.

In beiden Fällen sind die Lichtintensitäten der Strahlengänge regulierbar. LAND geht im allgemeinen von einer "günstigen Einstellung" aus. Über die Intensitäten für diese Einstellung bei den einzelnen Versuchen macht LAND keine näheren Angaben. In der normalen Versuchsanordnung beleuchtet das Licht kürzerer Wellenlänge das "kurzwellige", das Licht von längerer Wellenlänge das "langwellige" Bild. Kehrt man diese Anordnung um, so entsteht ebenfalls ein buntes Bild, aber komplementär zu den natürlichen Farben der Gegenstände, so daß auf einer Portraitaufnahme Lippen blaugrün und blonde Haare bläulich aussehen.

Das wichtigste Ergebnis der systematischen Untersuchungen besteht in einem Koordinatensystem, das eine wesentliche formale Bedingung dieses Phänomens beschreibt. Es läßt sich durch zwei einfache Messungen an jedem Bildpunkt herstellen: das langwellige Bild sei mit rotem Licht projiziert, das andere mit weißem. Nachdem die Bilder übereinanderprojiziert

sind, ist ein vielfarbiges Stilleben zu sehen. Jetzt schaltet man z.B. zuerst den roten Strahlengang aus, und es bleibt auf der Leinwand nur noch das von dem weißen Projektor ausgehende farblose Bild.

Auf diesem mißt man für jeden Gegenstand oder in einem beliebig feinen Raster von Punkt zu Punkt die Intensität des Lichtes an der Leinwand. Die gleiche Messung wird separat an dem anderen allein projizierten Bild wiederholt. Jetzt setzt man für den hellsten Punkt eines jeden Bildes als Einheit 100 fest, und alle übrigen Meßwerte werden auf diesen hellsten Punkt als Prozente bezogen.

Beiden Meßreihen ordnet man je eine Achse eines Koordinatensystems zu und trägt jeden gemessenen Bildpunkt nach seinen Koordinaten ein. Dabei werden viele Bildpunkte auf gleiche Koordinaten fallen. Schaltet man wieder beide Projektoren zusammen ein, so daß sich das bunte Bild zeigt, dann ergibt sich, daß alle Bildpunkte mit gleichen Koordinaten die gleiche Farbe haben (Abb. 1). Die Achsen dort sind logarithmisch abgestuft, was aber hier nicht von wesentlicher Bedeutung zu sein braucht.

Dieses Farbsystem gilt nicht allein für ein spezielles Bild, sondern es gilt allgemein für jedes Bild, das nach dem gleichen Verfahren aufgenommen und wiedergegeben worden ist. Man kann also schon aus den Durchlässigkeiten eines beliebigen Paares von Diapositiven (langwelliges und kurzwelliges) anhand des Diagramms die Farben bestimmen, ohne die dargestellte Szenerie in ihrer farbigen Zusammensetzung zu kennen.

Das Diagramm enthält nur sehr unpräzise Angaben, indem die Farborte durch bloße Farbnamen bezeichnet sind. Es läßt sich aber eindeutig ersehen, daß man durch Farbmischung für jedes beliebige Paar von Komponenten günstigstenfalls immer nur die Hälfte der im Diagramm angegebenen Hauptfarben erhalten könnte.

Die Helligkeiten sind noch kursorischer angegeben und über die Sättigung läßt sich nichts entnehmen. Auch sonst sieht

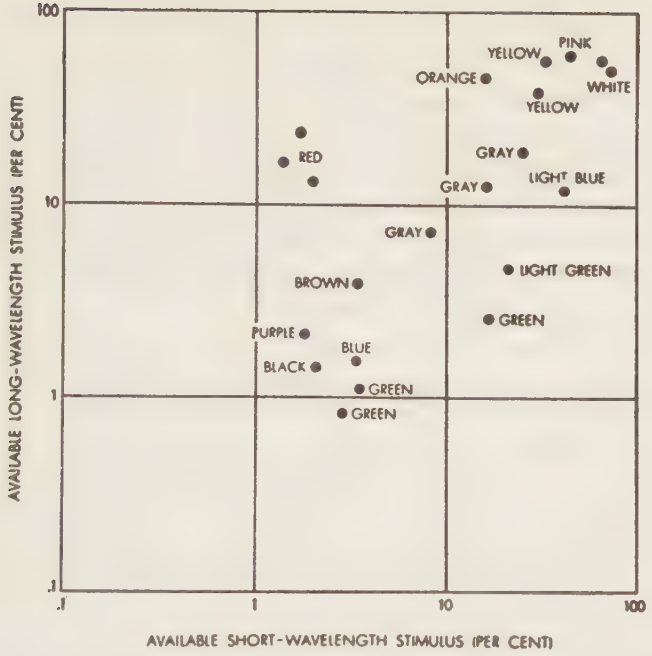


Abb. 1 (LAND 1959c): Farbortesystem

Die Farborte ergeben sich aus den Intensitäten von zwei Projektionslichtern.

Die Abszisse gibt die Intensitäten des kurzwelligen Lichtes an, die Ordinate die des langwelligen.

Jedes Projektionslicht beleuchtet ein Bild. Die hellste Stelle eines jeden Bildes wird als Maßeinheit gewählt und die übrigen Bildstellen in Prozenten auf diese Maßeinheit bezogen.

Die Achsen sind logarithmisch abgestuft.

LAND davon ab, über diese beiden Variablen Angaben zu machen. Seine Ausführungen beschränken sich darauf, das Erscheinen von unerwarteten Farbtönen übernaupt zu zeigen.

Zu der Anordnung der Farben auf dem Diagramm wird nur bemerkt, daß die unbunten Farben von Schwarz bis Weiß auf der Diagonalen liegen und die "warmen" Farbtöne oberhalb, die "kalten" unterhalb von ihr liegen. Immerhin genügen diese Hinweise, um zu vermuten, daß es sich nicht um eine statistische Verteilung der Farborte handelt, sondern wahrscheinlich um eine sinnvolle Ordnung.

d) Systematische Veränderung der Reizlichter

Als nächstes wurden alle möglichen Paare von Spektralfarben zur Beleuchtung der Bilder verwendet. Hierbei bediente LAND sich einer Apparatur, die es erlaubte, mit monochromatischen Lichtern zu arbeiten. Sie bestand in einem "Guckkasten", in dem die beiden Bilder durch je einen Monochromator mit Lichtern verschiedener Wellenlänge beleuchtet und übereinander gespiegelt werden konnten. Dies ist keine wesentliche Veränderung der Versuchsbedingungen gegenüber den vorher beschriebenen. Es wird damit nur die Schwierigkeit umgangen, monochromatische Lichter aller Wellenlängen mit der für die Projektion auf eine Leinwand nötigen Energie herzustellen.

Das Ergebnis der Kombinationen aller Lichter des Spektrums zeigt Abb. 2. Die Abszisse gibt die Wellenlänge an, die für das kurzwellige Bild, die Ordinate diejenige, die für das langwellige Bild als Beleuchtung gedient hat. Jede Kombination eines langwelligen mit einem kurzwelligen Licht führ auf einen Punkt des Diagramms. Die Farbnamen in den dort eingezeichneten Feldern geben an, welche Farben für den entsprechenden Bereich von Kombinationen ausfallen.

Entlang der Diagonalen zieht sich ein Feld hin, welches eine Art "achromatisches Intervall" darstellt. Alle Lichterkombinationen, die dort hineinfallen, lassen das Phänomen nicht eintreten. Diese Lichter liegen auf dem Spektrum zu

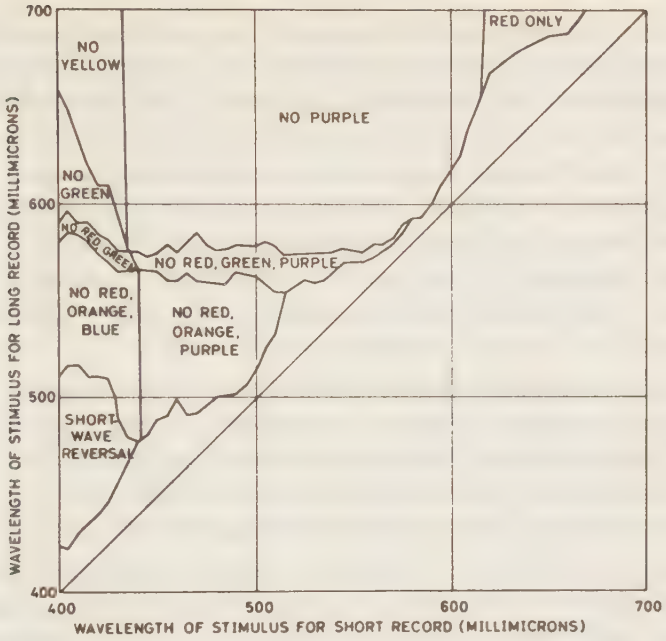


Abb. 2 (LAND 1959c) Ausfälle einzelner Farben bei systematischer Kombination von Projektionslichtern aller Wellenlängen

Abszisse gibt die Wellenlänge des kurzwelligen, Ordinate die des langwelligen Lichtes an.

Jede Kombination von Lichtern fällt in einen Bereich, in dem die Farben eingetragen sind, die auf dem Bild nicht erscheinen.

Das Diagramm ist halbseitig, weil alle Paare von Lichtern nach kurzwellig und langwellig geordnet, d.h. nur einmal vorkommen.

Der durchgängige Bereich entlang der Diagonalen bezeichnet Kombinationen, die das Phänomen nicht eintreten lassen. Das Bild sieht dann verwaschen einfarbig aus.

Der Bereich links unten "Kurzwellenumkehr" beschreibt Lichterpaare, in denen das regelgerecht mit einem kurzwelligen Licht zu projizierende Bild langwellig und das zweite entsprechend kurzwellig projiziert werden muß.

dicht beieinander. Das Bild bleibt unter solchen Umst änden verwaschen einfarbig, d.h. es sieht so aus, wie man es den Reizgegebenheiten entsprechend erwarten soll. Man muß danach zwischen solchen Fällen unterscheiden, in denen das Phänomen eintritt, aber einige Gegenstände der farbigen Szenerie auf dem Bild farblos bleiben, und anderen Fällen, in denen das Phänomen ausbleibt. Das als "achromatisches Intervall" bezeichnete Areal definiert den Minimalabstand, den die Wellenlänge des kurzwelligen Lichtes von der des langwelligen haben muß, wenn das Phänomen eintreten soll.

Der Begriff "achromatisches Intervall" hat hier natürlich nichts mit der sonst üblichen Verwendung dieses Ausdruckes in der Farbenlehre zu tun. Normalerweise ist damit ein Helligkeitsbereich bezeichnet, in dem die Helligkeit nicht ausreicht, um ein farbiges Licht farbig erscheinen zu lassen.

Noch zwei andere Felder nehmen eine Sonderstellung ein. Auf dem Diagramm ist rechts oben ein Feld bezeichnet, in dem das Phänomen eintritt, aber offenbar nur rote Färbung vorkommt. Im Text finden sich keine genaueren Angaben, so daß man nur erschließen kann, worum es sich handeln soll. Wahrscheinlich wird es so sein, daß Rot nur an einigen Stellen auftritt, während es reizgemäß über das ganze Bild hin zu erwarten gewesen wäre.

Ein zweites Feld links unten ist als "Kurzwellenumkehrung" bezeichnet. Für Kombinationen, die in diesen Bereich fallen, zeigt sich die schon kurz beschriebene Umkehrung der Farben auf dem Bild, wenn man nach der üblichen Regel vorgeht. Um zu vermeiden, daß auf einer Portraitaufnahme die Lippen etwa blaugrün aussehen, muß man für diese Fälle das kurzwellige Bild mit dem Licht längerer Wellenlänge bestrahlen und das langwellige Bild mit dem Licht kürzerer Wellenlänge. Die am Spektrum orientierte Unterscheidung von kürzeren und längeren Wellenlängen trägt also für Violett und rötliches Blau offenbar nicht. Man kann vermuten, daß sich hier der Umstand bemerkbar macht, daß die beiden Enden des Spektrums,

also Violett und fernes Rot, einander wieder ähnlich werden. Werden solche Reizlichter beispielsweise mit einem grünen Reizlicht kombiniert, scheinen sie sich funktional wie rötliche zu verhalten.

LAND gibt für die Ausfälle von Farben bei bestimmten Lichterkombinationen keine Erklärung. Auch hier soll nicht versucht werden, eine Regel für die Farbausfälle zu finden. Es sei nur angemerkt, daß bei der Kombination von zwei farbigen Lichtern in allen Fällen mindestens eine Farbe (z.B. Purpur) des Phänomens entfällt.

Das Diagramm enthält kein Protokoll über Kombinationen von einem farbigen und weißem Licht. Unter diesen Kombinationen scheint es besonders günstige Fälle zu geben, in denen keine Farbe ausfällt. Bemerkenswert ist, daß ein mit rotem und weißem Licht auf eine Leinwand projiziertes Bild, mit Farbfilm photographiert, tatsächlich eine bunte Reproduktion ergibt, wie LAND berichtet. Natürlich handelt es sich hier in erster Linie um einen rein photographischen Effekt, der nicht ohne weiteres mit dem visuell wahrgenommenen Phänomen in Zusammenhang gebracht werden darf.

Aus theoretischen Gründen ist besonders bemerkenswert, daß für den gesamten Bereich von etwa 575 nm an aufwärts alle Kombinationen dieser Wellenlängen mit den dazugehörigen kompensativen Wellenlängen günstige Fälle in dem Sinne darstellen, daß nur Purpur ausfällt. Es ist also für das Entstehen des Phänomens weder wichtig noch günstig, daß sich aus den beiden Reizkomponenten durch Mischung weitere Farbtöne ergeben. Komplementäre Farben lassen sich nur zu Weiß mischen, während andere, wie z.B. Grün und Rot, in Mischung Gelb als neuen Farbton entstehen lassen. Diese Kombination ist aber hinsichtlich der Zahl der ausfallenden Farben nicht besser als ein komplementäres Farbenpaar.

Dem Diagramm läßt sich noch ein wichtiger Hinweis entnehmen: Der Bereich längs der Diagonalen hat in guter Annäherung die Form der sogenannten Schwellenwertkurve. Diese bezeichnet

denjenigen Abstand in Wellenlängen, der gegeben sein muß, um von einer bestimmten Farbe ausgehend, einen "ebenmerklichen Empfindungsunterschied" hinsichtlich des Farbtones hervorzurufen. Abb. 3 zeigt einen Vergleich verschiedener Schwellenwertkurven mit dem Diagonalbereich des beschriebenen Diagramms. Die Kurven unterscheiden sich von diesem lediglich durch einen Faktor, Wenn der Vergleich dieser beiden Kurven sachlich gerechtfertigt ist, so würden sie beide einen Abstand zweier Lichter bezeichnen, der nötig ist, um einen bestimmten subjektiven Unterschied hervorzurufen. Als subjektives Maß ist der ebenmerkliche Empfindungsunterschied eine konstante Größe. Der Kurvenzug über dem Spektrum zeigt, daß ein verschieden großer Unterschied in Wellenlängen gegeben sein muß, um den immer gleichen subjektiven Empfindungsunterschied hervorzurufen. Auf die entsprechenden Umstände des LANDschen Phänomens gewendet würde dies bedeuten, daß das diagonale Feld nichts anderes als einen konstanten subjektiven Unterschied der zu kombinierenden Lichter als Bedingung für das Auftreten des Phänomens beschreibt.

LAND macht keine Angaben darüber, wie sich eine Vergrößerung dieses Minimalabstandes auf die Güte der Reproduktion der farbigen Gegenstände auswirkt. Lediglich aus beiläufigen Bemerkungen wie "Bei einem so geringen Abstand der Lichter erscheinen die Farben natürlich sehr ungesättigt", läßt sich schließen, daß die Reproduktion mit steigendem Abstand der Lichter besser wird. Wenn diese Vermutung zutrifft, würde der bei komplementären Farben gegebene maximale Abstand auch in diesem Sinne den günstigsten Fall darstellen.

e) Invarianz der Farborte

Die hier diskutierten farbigen Erscheinungen erhalten sich nicht nur unter sehr verschiedenen Reizbedingungen, sondern sie bleiben auch bezüglich ihrer formalen Eigenschaften als ein protokolliertes System von Farborten invariant. Bei einem Wechsel der Reizfarben braucht weder eine Veränderung

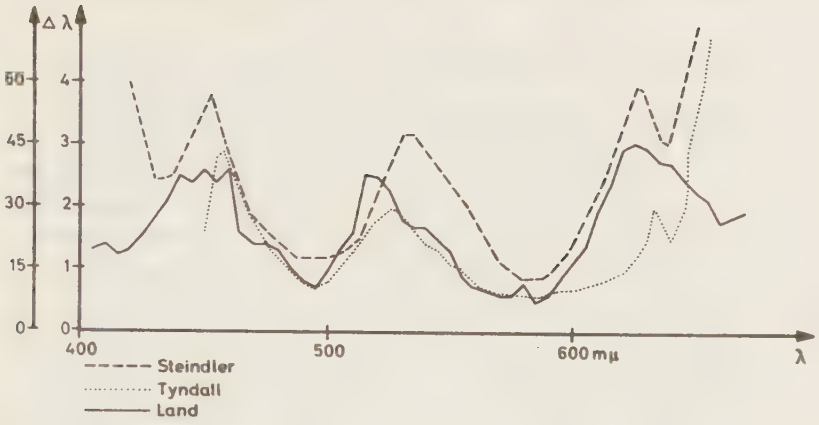


Abb. 3 Vergleich von zwei Verteilungen ebenmerklicher Empfindungsunterschiede für Spektralfarben mit dem Diagonalbereich aus Abb. 2

Die Abszisse gibt die Wellenlänge an. Die Ordinate stellt die Größe der ebenmerklichen Empfindungsunterschiede in Wellenlängen dar. Für den Diagonalbereich gilt das gleiche Maß mit 15 multipliziert.

Die Kurven von STEINDLER und TYNDALL sind nach RICHTER (1940) reproduziert.

der Abstände zwischen den einzelnen Farborten noch eine Rotation des ganzen Gebildes vorgenommen zu werden.

Dem Diagramm über die Farbausfälle kann man beispielsweise entnehmen, daß zwei verhältnismäßig dicht beieinander liegende gelber Lichter ein "vollfarbiges" Phänomen ergeben. Denkt man sich die Intensitäten dieser beiden gelben Lichter als Achsen des Systems der Farborte abgetragen, so sieht man, daß diese Lichter gerade an den Orten ihrer höchsten Intensität nicht gelb im Sinne der normalen Reizzuordnung aussehen, sondern rot auf der einen Seite und grün auf der andern. Mit andern Worten kann ein Licht seine Farbe an einer Stelle des Bildes verlieren, wenn das Diagramm der Farborte dies vorschreibt. Natürlich ist eine solche Redeweise nur metaphorisch zu verstehen, denn dies alles ergibt sich allein aus der Tatsache, daß die Verhältnisse von absoluten Intensitäten überhaupt nicht in das Protokoll eingetragen werden.

Der Ort einer Farbe ist durch ein Verhältnis von Verhältnissen festgelegt. Das relative Maximum einer Reizfarbe an einer Stelle des Farbortesystems kann durchaus bedeuten, daß die andere Reizfarbe hier einen absoluten Intensitätsbetrag besitzt, der höher ist. Die Unabhängigkeit von den Intensitätsbeträgen gilt natürlich nur in gewissen Grenzen. Für einige Lichterpaare hat LAND diese Toleranzen untersucht. Die Tabelle in Abb. 4 zeigt, inwieweit man die Intensitäten der Reizlichter gegeneinander verschieben kann, bis sich einzelne Farben auf dem Bild wesentlich verändern.

Will man sich die Spanne, in der das möglich ist, veranschaulichen, braucht man sich nur vorzustellen, die Diapositive würden aus dem Gerät entfernt, so daß man auf einer homogenen Fläche das Verhalten der Lichter beobachten kann. Variiert man nach beiden Seiten in einem Verhältnis von 1:5, so entspräche dies einer stetigen Mischreihe, deren Aussehen sich von reinem Blau bis zu reinem Gelb variieren würde, wenn man die Reizlichter in Betracht zieht, für welche die erwähnte Tabelle gilt.

COLORS SEEN	RANGE OVER WHICH SEEN	VARIATION IN COLOR OVER THIS RANGE
GRAY	200 TO 1	LITTLE VARIATION
BROWN	100 TO 1	YELLOW-BROWN TO DARK BROWN
WHITE	100 TO 1	YELLOWISH-WHITE TO BLUISH-WHITE
YELLOW	30 TO 1	YELLOW TO OFF-WHITE
YELLOW-GREEN	30 TO 1	YELLOW-GREEN TO YELLOW ORANGE
BLUE	10 TO 1	BLUE-VIOLET TO BLUE GREEN
GREEN	6 TO 1	BLUE-GREEN TO GRAY-GREEN
RED	5 TO 1	DARK RED TO DARK ORANGE-RED
ORANGE	5 TO 1	YELLOW TO RED-ORANGE

Abb. 4 (LAND 1959c)

Die Tabelle zeigt ein Beispiel für Veränderung des Aussehens verschiedener Farben des Phänomens bei Variation der Intensitätsverhältnisse der zwei Projektionslichter (450 nm und 475 nm).

Spalten von links nach rechts: Die betrachteten Farben; Bereich von Intensitätsverhältnissen, in dem die Farben erhalten bleiben; Veränderungstendenzen der Farben innerhalb des angegebenen Bereichs.

Bei einer gleichen Intensitätsveränderung mit eingeschobenen Bildern würden sich die Farben des Phänomens wenig ändern.

f) Verschiedene Reizkonfigurationen

In weiteren Untersuchungen beschäftigt sich LAND mit dem Einfluß der Wahrnehmungsbedingungen. Es werden nicht mehr die Reize, soweit sie die Lichtarten und deren Intensitäten betreffen, verändert, sondern ihre Konfiguration auf der Bildebene. Hierzu werden Bedingungen erzeugt, die zum vollständigen Ausbleiben des Phänomens führen. LAND nennt diese Fälle "achromatische Situationen". In anschließenden Untersuchungen werden die Umfeldbedingungen für die ganze Bildebene, die Leinwand oder deren Äquivalent verändert. In solchen Fällen spricht LAND von "koexistenten Farbwelten".

In diesem Unterabschnitt werden zunächst die Veränderungen der Reizkonfiguration besprochen. Der Ausdruck "Reizkonfiguration" bezieht sich nicht auf andere Anordnungen der photographierten Gegenstände in den Bildern, sondern auf eine andere Verteilung der Reizlichter über die Leinwand. Dies wird beispielsweise erreicht, indem nicht mehr ein "kurzwelliges" und ein "langwelliges" Bild, sondern zwei kurzwellige zusammen projiziert werden. Es handelt sich dabei immer um Manipulation der Verhältnisse und Intensitäten, die auf dem Bild vorkommen. Wenn man beispielsweise zwei langwellige Bilder mit zwei verschiedenen Lichtern übereinanderwirft, so sind deren Verhältnisse an jedem Bildpunkt gleich, weil die beiden identischen Bilder an jeder Stelle gleich viel von ihren Projektionslichtern durchlassen.

Worin sich verschiedene Konfigurationen unterscheiden, läßt sich am besten aus der Lage der Bildpunkte in dem üblichen Diagramm, in welches sonst die Farborte eingetragen werden, ersehen. Abb. 5 gibt die Lage der Bildpunkte für einige achromatische Situationen wieder, die sich nach dem beschriebenen Maßverfahren ergeben. Sie liegen alle auf geraden Li-

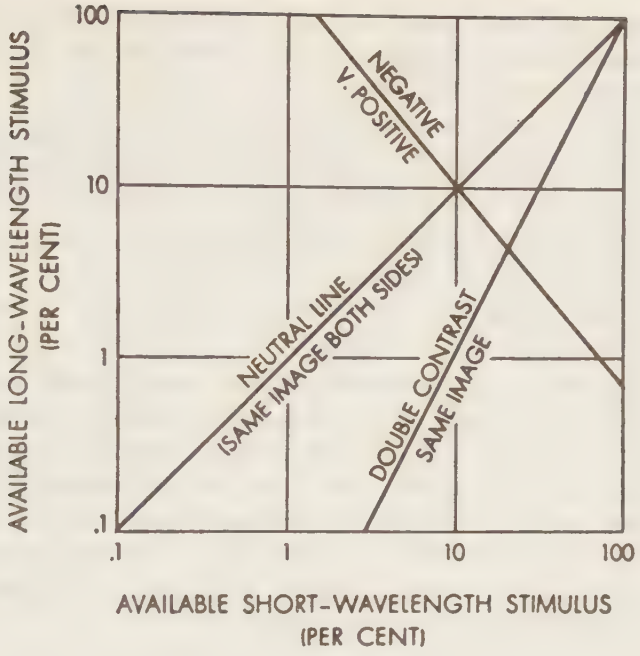


Abb. 5 (LAND 1959c) Lage der Meßwerte aller Bildareale für bestimmte Kombinationen von Bildern, in denen das Phänomen nicht eintritt.

Diagonale: Kombination von zwei identischen Bildern.

Gerade, die lotrecht zur Diagonalen verläuft: Kombination eines photographischen Negativs mit seinem Positiv.

Von Abszissenmitte zur oberen Ecke verlaufende Gerade: Kombination von drei identischen Bildern. Ein Bild wird mit dem ersten Projektor, die beiden anderen zusammen mit dem zweiten Projektor projiziert.

nien im Diagramm. Man kann aber in allen Fällen aus der Art der Kombination ohne Messung schließen, wie die Bildpubkte liegen müssen.

Es werden hier nur fünf Varianten von LANDS Versuchen dieser Art beschrieben, die für die späteren Ausführungen besonders wichtig erscheinen. Die Beschreibungen beziehen sich hier in allen Fällen auf rote und grüne Reizlichter. "Achromatisch" nennt LAND in diesen Versuchen solche Situationen, in denen das Phänomen ausbleibt, Dies trifft für alle fünf Versuche, die hier wiedergegeben werden, zu.

Man muß sich aber vergegenwärtigen, daß jeweils zwei Erwartungen vor jedem Versuch gegeben sind. Einmal kann man bei einer bestimmten Lage der Bildpunkte erwarten, daß auf der Leinwand die Farben zu sehen sind, die nach dem LANDschen Farbortesystem zu erwarten gewesen wären, was in keinem der fünf Fälle eintritt. Andererseits kann man nach den klassischen Mischgesetzen die normalen Mischfarben erwarten, wenn das Phänomen nicht zustande kommt.

LAND hat in jedem Versuch die Intensitäten des roten und grünen Lichtes gegeneinander verstellt, so daß immer auch echte Mischungsverhältnisse realisiert waren. Damit fällt die Einschränkung fort, daß das Diagramm nicht hinsichtlich der Verhältnisse absoluter Intensitäten interpretierbar sei. Die Versuche sind jetzt so eingerichtet, daß man die Achsen des Farbortediagramms auch als Intensitätsbeträge verstehen kann. Gleiche Verhältnisse von rotem und grünem Licht liegen immer auf Strahlen, die vom Koordinatenursprung ausgehen. Liegen alle Bildpunkte auf einem solchen Strahl, so haben sie ein gleiches Mischungsverhältnis der Lichtfarben und verschiedene Summen der Lichtintensitäten, also verschiedene Helligkeiten. Gleiche Summen liegen auf parallelen Graden zu der von dem einen Hundert-Punkt zum anderen verlaufenden Diagonalen. Bildpunkte auf einer solchen Geraden haben gleiche Helligkeit, aber verschiedene Mischungsverhältnisse.

Erster Versuch: In beiden Projektoren befindet sich je ein

kurzwelliges oder je ein langwelliges Bild. Die Bildpunkte liegen auf der Mitteldiagonalen. Erwartungsgemäß ist das Bild einfarbig bis farblos; denn bezogen auf das Farbortesystem fallen sie mit der Graulinie zusammen und als Gemisch haben sie alle das gleiche Verhältnis und nur verschiedene Intensitäten. (s. Abb. 5 "same image both sides").

Zweiter Versuch: Von drei Identischen Bildern werden zwei zusammen in den einen, das übrige in den anderen Projektor geschoben. Aus Gründen, die hier nicht erklärt werden sollen, liegen alle Bildpunkte auf einer Geraden, die von dem Mittelpunkt der Abszisse zur oberen Ecke des Diagramms verläuft. Das Bild ist wieder einfarbig bis farblos. Es sind also weder Farben des Phänomens aufgetreten noch solche, die man nach den Mischungsverhältnissen erwartet hätte, weil die Gerade ein ganzes Büschel von Verhältnisstrahlen schneidet. (s. Abb. 5 "double contrast same image)

Dritter Versuch: Nur ein Projektor bekommt ein Bild, der andere hellt die Leinwand gleichmäßig auf. Die Bildpunkte liegen auf einer Parallelen zu einer der Achsen und diese Parallele schneidet alle Verhältnisstrahlen. Obgleich alle Mischungsverhältnisse und viele Helligkeiten auf dem Bild sind, ist es einfarbig bis farblos.

Vierter Versuch: Von der gleichen Aufnahme wird ein photographisches Positiv mit dem einen Projektor und das dazugehörige Negativ mit dem anderen projiziert. Da ein Positiv genau die Umkehrung seines Negativs ist, liegen die Bildpunkte auf einer Geraden gleicher Intensitätssummen oder Helligkeiten, die alle Verhältnisstrahlen schneidet. (Abb. 5 "negative vs. positiv"). Hier erscheinen alle aus den Projektionslichtern mischbaren Farben von Rot über Gelb nach Grün auf der Leinwand. Das Phänomen tritt nicht ein.

Fünfter Versuch: Diesesmal wird keine Photographie verwendet. Stattdessen wird in den einen Projektor ein abgestufter Graukeil horizontal und in den anderen ein gleicher vertikal

eingeschoben. Die Leinwand erscheint als ein in 256 Felder eingeteiltes Quadrat. Es sind die als Gemische zu erwartenden Farben Rot, Gelb und Grün zu sehen. Die Leinwand gibt in diesem Falle das Diagramm selbst in einem Raster von 256 Feldern wieder. Es sind so gut wie alle möglichen Verhältnisse und Helligkeiten realisiert. Die einzelnen Felder liegen jedoch regelmäßig angeordnet im Gesichtsfeld. Die geometrische Lage der Verhältnisstrahlen und der Geraden gleicher Intensität sind hier visuell realisiert.

Es ist rein formal gesehen einfach, aus diesen Versuchen die Bedingungen anzugeben, die erfüllt sein müssen, damit das Phänomen eintreten kann. Die Bildpunkte einer Bilderkombination müssen einerseits so verteilt sein, daß ihre Meßwerte nicht auf eine Gerade fallen und zusätzlich muß das Wahrnehmungsfeld so strukturiert sein, daß im Blickfeld keine regelmäßig abgestuften Reihen vorkommen. - Es ist zu beachten, daß sich die eine Bedingung auf die Lage von Meßwerten im Diagramm der Farborte bezieht und die andere auf die Anordnung von Bildarealen im Gesichtsfeld.

Der erste Versuch, der erwartungsgemäß verlaufen ist, kann beiseite gelassen werden. Von den übrigen fällt zunächst der zuletzt beschriebene auf. Wenn das Kriterium einfach hingenommen wird, nachdem solche Bilder, deren Meßwerte auf eine Gerade fallen, achromatisch sind, muß man sich nach den Gründen, weshalb das gleiche Kriterium nicht auch für den letzten Versuch gilt, fragen.

LAND hat aus der regelmäßigen Anordnung der einzelnen Felder nur geschlossen, daß diese für das Eintreten des Phänomens in unsystematischer und zufälliger Folge über die Bildfläche verteilt sein müßten. Bei "natürlichen Bildern" ist dies immer gegeben. LAND merkt an, daß der Blick in diesem Versuch bei jeder Augenbewegung über kontinuierlich angeordnete Reihen gleitet.

Man kann sich vorstellen, daß eine solche Anordnung die Unterschiede zwischen den Feldern zu einem Kontinuum ver-

schmilzt, wobei Richtungsänderungen der Blickbewegung jeweils die Art der Zusammenfassung zu einer Reihe ändern. In einem Fall kann das Auge entlang einer Reihe mit konstanten Verhältnissen und steigenden Intensitäten, also auf einem Verhältnisstrahl entlang wandern und in einem anderen Fall in einem Winkel zu einem Verhältnisstrahl, so daß sich das Verhältnis un die Intensität in einer konstanten Beziehung zueinander ändern. Man könnte alle diese Wege, soweit sie über einfache Reihen gehen, etwa durch lineare Funktionen beschreiben. Es scheint sich nun auch für die Wahrnehmung nach dem Modell solcher linearen Funktionen jeweils eine Invariante auszubilden, die das Auftreten des Phänomens verhindert, obgleich sonst die Reizbedingungen dafür in Vollständigkeit gegeben sind.

Es ist schwieriger zu verstehen, wieso im Effekt das Gleiche auch in anderen Versuchen geschieht. Gemäß der Anordnung des zweiten Versuches, wo die Bildpunkte auf einer Parallelen zu einer der Achsen liegen, lassen sich die meisten Verhältnisse und Intensitäten gleichzeitig realisieren und die Bildareale liegen über die Leinwand verstreut, so daß sich keineswegs Reihen ausbilden können, weil ähnliche Reizkonfigurationen auch räumlich beieinander lägen. Allerdings liegen die Meßpunkte dieses Bildes auf dem Farborte-Diagramm auf einer ebensolchen Reihe, wie sie sich dort bei der Wanderung des Blickes im vorigen Beispiel hätte ausbilden können. Wenn man solche durch lineare Gleichungen beschreibbaren Wege als Ausdruck für eine Invariantenbildung der Wahrnehmung ansieht, so läßt sich der Fall, in dem ähnliche Felder auch in ihrer räumlichen Lage kontinuierlich aneinandergrenzen, verallgemeinern.

Es wäre dann die Situation gegeben, daß sich nicht nur sowohl räumlich Beieinanderliegendes, was auch ähnlich ist, zusammenschließt, sondern Ähnliches auch dann, wenn es räumlich nicht kontinuierlich und nicht nach Nähe angeordnet ist. Solche außerörtlichen Zusammenschlüsse nach Ähnlichkeit sind aus der Wahrnehmungslehre bekannt und stellen eins der

stärksten Organisationsmomente des Wahrnehmungsfeldes dar. Diese Erörterungen werden an anderer Stelle nochmals aufgegriffen.

g) Gleichzeitig gegebene Farbwelten

In weiteren Experimenten zeigt LAND was geschieht, wenn man verschiedene Farbwelten gleichzeitig betrachtet. Unter einer "Farbwelt" versteht er eine bestimmte Wahrnehmungssituation, in der farbige Phänomene unter jeweils bestimmten Reizbedingungen auftreten. Versuchsanordnungen wie die von LAND beschriebenen erzeugen besondere Bedingungen für das Sehen von Farben. Wendet man aber den Blick von der Bildebene ab in den umgebenden Raum, so sieht man auch dort Farben, aber unter anderen Reizbedingungen, nämlich denjenigen, die normalerweise in unserer Umwelt herrschen. Solche verschiedenen Bedingungen nennt LAND "verschiedene Farbwelten".

Ein sehr einfacher Versuch, nebeneinander bestehende Farbwelten zu vergleichen, besteht darin, bei der Projektion eines farbigen Arrangements nach dem LAND schen Verfahren die Lichtverhältnisse zwischen der Leinwand und dem umgebenden Raum so einzurichten, daß auch die Farben des umgebenden Raumes wahrgenommen werden können. Es zeigt sich, daß man sowohl die unter Sonderbedingungen entstandenen Farben auf der Leinwand als auch die im Raum vorkommenden gleichzeitig betrachten kann, ohne daß diese verschiedenen Farbwelten sich gegenseitig beeinflussen.

LAND ist noch einen Schritt weiter gegangen, indem er zwei Vorrichtungen nebeneinanderstellte, die beide ein LANDsches Phänomen zeigten, das in dem einen Fall durch Gelb und Rot, in dem anderen Fall durch Gelb und Grün hervorgerufen war. Diese Vorrichtungen gaben je ein Bild ab, daß sowohl groß als auch hell genug war, um es frei im Raum aufzustellen, so daß ein Beobachter bequem die beiden Vorrichtungen und gleichzeitig den umgebenden Raum mit seinen Farben betrachten konnte. Auch unter diesen komplizierteren Bedingungen beeinträchtigten sich die verschiedenen Farbwelten keineswegs.

Die Szenerien, die in den Vorrichtungen zu sehen waren, stellten einunddasselbe Arrangement dar. Eine rote Pfefferdose, die auf beiden Bildern zu sehen war, wurde also einmal durch einen überwiegenden Anteil gelben Lichtes beleuchtet, das andere Mal durch einen überwiegenden Anteil roten Lichtes; denn die eine Vorrichtung hatte ja Gelb als längerwelliges Licht und Grün als kürzerwelliges, während in der anderen Apparatur Gelb als kurzwelliges und Rot als langwelliges Licht diente. Rote Gegenstände im Raum wurden ebenfalls als solche wahrgenommen.

LAND knüpft an diese Versuche, die hier sehr vereinfacht beschrieben worden sind, an einer Stelle (1959c) einige theoretische Betrachtungen.

Es ist aus dem letzten Versuch deutlich, daß die einzig naheliegende Annahme zur Erklärung der unbehinderten Koexistenz mehrerer Farbwelten darin besteht, einen Vorgang anzunehmen, für den die reizmäßigen Unterschiede der Farbwelten irrelevant sind.

LAND kommt dabei zu der Hypothese, daß das Auge überhaupt nur nach kürzeren und längeren Wellenlängen unterschiede und daraus die Farbwahrnehmung aufbaue. Verschiedene Paare von Reizlichtern unterschieden sich überhaupt nur dadurch, daß sie an einer jeweils anderen Stelle des Spektrums einen Nullpunkt (fulcrum) als Unterscheidungskriterium für "kurzwellig" und "langwellig" aufbauten. Andere Bemerkungen ähnlicher Art sollen hier unerwähnt bleiben.

Offenbar verbindet LAND mit solchen kurzen Erörterungen keine ernsthaften Erklärungsversuche, zumal sie sich alle in einer Veröffentlichung finden, die ausgesprochen popularisierende Tendenzen verfolgt (in "Scientific American"). In den beiden übrigen Veröffentlichungen (1959 a, b) berichtet LAND so gut wie kommentarlos über seine Versuche.

2. Ansätze zu Erklärungen durch Zusatzhypothesen

a) Kontrast

Die Stellungnahmen zu den LAND schen Versuchen und teilweise

auch Kritiken an seinen wenigen theoretischen Äußerungen begnügen sich meistens mit der mehr oder weniger expliziten Feststellung, daß die aufgewiesenen Phänomene Wirkungen von Umstimmung und Kontrast seien.

Solchen Ansichten läßt sich im allgemeinen entnehmen, daß sie das Prinzip der Farbenmischungen zugrundelegen und die von LAND gezeigten Erscheinungen durch Zusatzbedingungen erklären wollen. Präziser ausgedrückt: die von den klassischen Farbenmischungen abweichenden Ergebnisse sollen aus den anderen Beobachtungsbedingungen hergeleitet werden, die ohne Frage gegeben sind. Ihre Wirkung wird ausschließlich im Sinne von Adaptation und Kontrast verstanden.

Es kann keinen Zweifel darüber geben, daß ein homogenes Bildareal eines LANDschen Versuches unter methodisch richtigen Bedingungen durch den Reduktionsschirm betrachtet, seine ursprüngliche Farbe verliert. Wenn also unter solchen Beobachtungsbedingungen die von den Reizen her zu erwartende Erscheinungsweise wiedergegeben ist, kann man schließen, daß das LANDsche Phänomen von Umgebungsbedingungen abhängig ist. Wenn man diese Abhängigkeiten schnell und unbesehen in Begriffe fassen will, bieten sich "Umstimmung" und "Kontrast" nahezu unausweichlich an.

Es soll nicht bestritten werden, daß diese Begriffe sich für viele Fälle glänzend bewähren. Dann ist aber immer eine bestimmte Ereignisstruktur festgelegt, die man erklären will, und eine andere, mittels derer man erklärt, und die dann dem Begriff einen Inhalt gibt. Es ist nicht nötig, ausdrücklich auf die vielen und unterschiedlichen Verwendungen dieser Begriffe hinzuweisen, um sagen zu können, daß sie ohne spezielle Definitionen nur Worte sind.

Etwas konkreter ist es schon, wenn man von speziellen Versuchsbedingungen ausgeht, die irgendeinen bestimmten Effekt zeigen, und dann darauf hinweist, daß Ähnliches auch im Falle des LANDschen Phänomens gegeben sein könne. Geht man beispielsweise von einigen der inzwischen klassisch gewordenen

Versuche HELSONs aus, so lassen sich die dort aufgewiesenen Bedingungen mit den Bedingungen des LANDschen Versuchs vergleichen. Dies muß aber gedanklich durchgeführt sein und darf nicht bei einer bloßen Feststellung bleiben, die sich auf Ähnlichkeiten bezieht.

Es ist überhaupt sinnlos, Phänomene miteinander zu vergleichen, wenn man nicht ihre Bedingungsstruktur in den Vergleich einbezieht. Man kann sich beispielsweise auf HELSONs Versuche mit Graustufen, die unter monochromatischem Licht betrachtet, teilweise die Farbe der Beleuchtung zeigen, teilweise farblos aussehen und teilweise in der Komplementärfarbe zur Beleuchtungsfarbe erscheinen, beziehen.

Soll durch deren bloße Erwähnung ein ähnliches Vorkommnis im Zusammenhang mit den LANDschen Versuchen erklärt werden, so ist dies vollkommen sinnlos; denn dort sind immer mehr als eine Reizfarbe beteiligt und dies ist, wie HELSON gezeigt hat, die Bedingung, unter der die von ihm als Kontrast und Adaptation bezeichneten Phänomene ausbleiben.

Von den Besprechungen des LANDschen Phänomens, die dem Verfasser bekannt geworden sind, scheint die von G.L.WALLS (1960) bezüglich der überhaupt in Erwägung gezogenen Umstände die vollständigste zu sein. WALLS stellt zu Beginn fest, daß die von LAND gezeigten Erscheinungen sämtlich mit altbekannten Vorstellungen erklärbar seien.

> "Tatsächlich stehen verschiedene Sprachen zur Verfügung: die des simultanen Kontrastes, die der außerordentlichen Induktion, EVANs drei Arten von chromatischer Adaptation, HELSONs Prinzip der Farbumkehrung usf." (S. 37)

Er schließt seine Ausführungen mit der Feststellung, das Wesentliche nur mit dem Gebrauch dieser "alten Sprache" erklärt zu haben. Lediglich hinterlasse er Anderen herauszufinden, warum LAND bestimmte Farben nicht erhält.

> "In jeder von diesen (Situationen, Verf.) bin ich sicher, wird irgendein einfaches Prinzip, welches zufällig mir als Nichtmathematiker unzugänglich ist, das Ausbleiben von 'Vollfarbigkeit' erklären." (S. 47)

Tatsächlich bringt WALLS sich in die Lage, gerade das Ausbleiben von Vollfarbigkeit nicht erklären zu können; denn außer dem Begriffsrepertoire der "alten Sprache" führt er noch das "Glühfadengelb" der Projektionslampe, beliebiges Aussehen der Komplementärfarbe zu Rot (Blaugrün) als Blau oder Grün und anderes ein. An der Sache geht WALLS vorbei, da er beispielsweise feststellt, daß das LANDsche Farbortesystem nur gültig sein könne, wenn zu jeder der dort eingetragenen Farbe ebenso die Reizbeschaffenheit ihrer unmittelbaren Bildumgebung mit angegeben wäre. Es wird einfach behauptet, das Aussehen eines Gegenstandes in diesen Bildern hinge in dem gleichen Maß von der induzierenden Umgebung wie von seiner eigenen Reizqualität ab. - Aber, wie schon gezeigt wurde, sind die Farben sowie die Farborte im Diagramm gerade davon unabhängig.

Systematisch gesehen geht WALLS von dem Modell aus, daß die nach den Mischgesetzen fehlende dritte Komponente jeweils durch Induktion der Komplementärfarbe entstände. Für alle Fälle, in denen zwei bunte Lichter gegeben sind, ergeben sich auf diese Weise schon vier Farben. Nimmt man hinzu, daß sowohl die beiden gegebenen Lichter als auch ihre durch Induktion entstandenen Komplementärfarben sich unbeschränkt mischen lassen, so kommt man für jeden Fall zu mehr Farben, als zur Aufstellung eines Gemischsystems nötig wären.

Falls die Farbe eines Gegenstandes auf dem Bild sich nicht aus ihren Reizlichtern und Induktion aus der unmittelbaren Umgebung erklären läßt, wird außerörtliche Induktion, also eine Induktion, die von ferne abliegenden Reizen ausgeht, hinzugenommen.

Es ist leicht zu sehen, daß man auf diese Weise das Ausbleiben von vollfarbigen Bildern nicht verständlich machen kann. Blau und Grün müßten, auf diese Weise verstanden, besonders günstige Farben sein, denn zusammen mit ihren Mischfarben und dazugehörigen Komplementärfarben ergäben sie eine mehr als hinreichende Konstellation für vollständige Farbigkeit des Bildes. Sucht man aber Blau und Grün im Diagramm für

Farbausfälle (Abb. 2) auf, so sieht man, daß nahezu für alle Paare des Blau- und Grünbereiches Orange, Rot und Purpur, d. h. die ganze komplementäre Reihe der zwischen Blau und Grün liegenden Farben ausfallen.

Wollte man schnell zu Erklärungen greifen,ließe sich das ganze Diagramm der Farbausfälle aus einer einzigen Regel ableiten: es fallen immer eine oder mehrere Komplementärfarben oder die Mischfarbe zu einem gegebenen Lichterpaar aus. In einigen Fällen bleiben sowohl die Mischfarbe als auch komplementäre Farben aus. Diese Regel würde durchgängig gelten, wie sich dem Diagramm entnehmen läßt. Auf diese Weise ließe sich durch die Wirksamkeit der induzierten Farben eher angeben, welche Farben ausbleiben als welche zusätzlich entstehen.

Die ganze Argumentation, die sich auf das Hinzukommen von Kontrastfarben stützt, läßt sich, soweit ich sehe, überhaupt angesichts der Tatsache nicht halten, daß die meisten komplementären Farbenpaare günstige Fälle für das Entstehen des Phänomens sind. (s.S.10-12). Zwei Komplementärfarben, z.B. Blaugrün und Rot, ergeben gemischt nur Weiß als neue Farbe und könnten durch Induktion wiederum nur Blaugrün und Rot erzeugen.

Rein theoretisch könnte man hier die Möglichkeit erwägen, daß eine induzierte Farbe ihrem Aussehen nach nicht mit derjenigen Farbe, die mit der induzierenden gemischt Weiß ergibt, vollständig identisch sei. Die induzierte Farbe ist der ebenfalls etwas abweichenden Nachbildfarbe ähnlich. Unter verschiedenen geeigneten Versuchsanordnungen ist es dem Verfasser nie gelungen, auch nur die geringste Spur von Farbigkeit durch Mischungen solcher Konstellationen zu erzeugen. Auch ist ihm kein Bericht bekannt, daß solches je gelungen sei.

Auch zur Mischung einer "wirklichen" Farbe mit einer durch ein Umfeld induzierten hat Verfasser eine Reihe von Versuchen angestellt. Es sollen hier weder die naheliegende Ver-

suchsanordnung im einzelnen noch die Ergebnisse vollständig wiedergegeben werden.

Es zeigt sich bei solchen Versuchen die häufig übersehene Schwierigkeit, daß die induzierte Farbe zunächst einmal nur erscheinen kann, wenn ein geeignetes "Trägerlicht" oder, in der HELMHOLTZschen Terminologie, eine "reagierende Farbe" gegeben ist. Hat man etwa ein rotes Umfeld, in dem ein nicht von rotem Licht beleuchteter Bezirk, auf den das Rot als induzierende Farbe wirken soll, so muß dieser Bezirk von einem anderen Licht bestrahlt werden. Wählt man Weiß als Trägerlicht, so zeigt sich sofort eine deutliche Verfärbung nach Blaugrün. Diese so induzierte Farbe läßt sich tatsächlich unter gewissen Einschränkungen bezüglich der zu verwendenden Energiebeträge mit anderen Farben mischen. Verwendet man aber eine andere Farbe als Weiß (oder Gelb, was beschränkt ebenfalls möglich ist) als Trägerlicht, so lassen sich die Wirkungen des induzierenden Umfeldes überhaupt nicht mehr oder nur in verschwindendem Maße nachweisen. Anschaulich gesprochen: das Trägerlicht nimmt die induzierte Farbe nicht an.

Diese Verhältnisse mögen sich unter komplexeren Versuchsbedingungen, wie sie das LANDsche Phänomen fordert, anders auswirken. Es ist durchaus vorstellbar, daß sich Farbinduktion dort auch gegen andere Trägerlichter als Weiß oder Gelb durchsetzt. Aber man kann sich leicht vorstellen, wieso alle Fälle, in denen ein farbiges Licht und weißes kombiniert werden, das gleiche Ergebnis zeigen wie wenn etwa zwei komplementäre Lichter gegeben wären; denn Weiß nimmt als Trägerlicht die induzierende Farbe leicht an und wirkt wie eine selbständig gegebene Farbe.

Es gibt aber hinsichtlich der Induktion von Kontrastfarben ein Problem, das sich anhand des dritten Versuches aus der Reihe der achromatischen Situationen demonstrieren läßt. Dort wurde ein lang- oder kurzwelliges Bild allein mit einem farbigen Licht projiziert und man ließ den zweiten Projektor ohne Bild die farbige Szenerie mit weißem Licht aufhellen. Hier wären eigentlich die idealen Bedingungen für das Auf-

treten von induzierten Farben gegeben. Wenn man das eine Bild allein projiziert, gibt es auf der Leinwand nahezu unbeleuchtete Felder und andererseits sehr lichtstarke Areale. Der zweite Projektor ohne Bild hellt diese Szenerie gleichmäßig auf, so daß farbige Bildareale etwas verweißlicht ihre Farbe beibehalten sollten und diejenigen Felder, die vorher nahezu schwarz waren, eine Zufuhr neutralen Lichtes bekommen, welches, wie man erwarten sollte, in idealer Weise als Trägerlicht für die induzierende Wirkung der farbigen Bildstellen fungieren sollte. Das Ergebnis des Versuches ist aber ein verwaschen einfarbiges Bild ohne eine Spur von Farbkontrast. Man muß sich danach vor allem fragen, warum keine Kontrastfarben auftreten, bevor man sich Vorstellungen bildet, wie diese sich in Mischungen auswirken könnten.

b) Adaptation

Das LANDsche Phänomen gibt nicht nur insofern Probleme auf, als mehr bunte Farben sichtbar werden, als sich aus den eingeführten Komponenten durch Mischungen herstellen ließen, sondern auch das Erscheinen aller unbunten Nuancen von Schwarz über Grau bis Weiß ließe sich durch Mischung nur im Falle komplementärer Komponenten erklären. Nun gibt es aber auch hier wieder eine Reihe von bekannten Phänomenen, in denen Weiß oder Farblos als Qualität entsteht, ohne daß Mischungen im Spiele wären. Ist ein Raum mit nicht allzu farbigem Licht beleuchtet, so nimmt man die Farbe der Beleuchtung beim Betreten des Raumes noch wahr, jedoch schon kurze Zeit danach hat man sich "adaptiert", d.h. die Farbe der Beleuchtung ist verschwunden. Blickt man dann aber durch eine kleine Öffnung auf eine graue Fläche, die außerhalb des Raumes von neutralem Licht beleuchtet ist, so erscheint diese Fläche in der Komplementärfarbe des Lichtes, an das sich der Beobachter adaptiert hat.

Im strengen Sinne handelt es sich hier nicht um das Verschwinden einer Qualität. Letzteres ist nur unter sehr

schwierig herzustellenden "Ganzfeldbedingungen" zu beobachten und ist unverwechselbar ein Phänomen sui generis.

Etwas besser treffen Vorstellungen zu, die sich nicht allein auf Adaptation oder Gewöhnung beziehen, sondern auf die Ausbildung eines Nullpunktes oder Durchschnittswertes der Beleuchtung. Doch muß man sich darüber klar sein, daß Ausdrücke wie "Durchschnittsfarbe" im allgemeinen nichts anderes als eine bloße Metapher sind. Wir haben kein Modell, das es uns erlauben würde, Farbqualitäten etwa nach dem Kalkül des arithmetischen oder geometrischen Mittels auf ihren Durchschnittswert hin zu errechnen. Denkt man hier etwa an die Formeln von HELSON (1938) zur Berechnung des Adaptationsniveaus, so muß man sich vergegenwärtigen, daß die darin vorkommenden Werte sich nur auf Intensitäten der Beleuchtungsfarbe und nicht auf Farbqualitäten beziehen.

Es braucht auch nur erwähnt zu werden, daß jede farbreizmäßig erfaßbare "Farbverzerrung" im Zusammenhang mit dem LANDschen Phänomen überhaupt nicht in Betracht gezogen werden kann, da es ja eben in vollständiger Abweichung von den Grundlagen der Farbmetrik zustandekommt.

Immerhin sind solche und ähnliche Vorstellungen zu einer ersten Orientierung nützlich. Wie aber soll man sie in Bezug auf Umstände zum Arbeiten bringen, die LAND in dem einfachen Experiment mit den koexistenten Farbwelten hervorruft? An welche Reizfarbe soll hier adaptiert werden? Wie kann man sich die Ausbildung eines Nullpunktes vorstellen, der für alle drei Farbwelten gültig ist?

Außerdem war im Anschluß an die Versuche zur Reizkonfiguration festgestellt worden, daß das Phänomen immer nur dann eintritt, wenn eine gewisse Diversität als gleichzeitige Variation von Intensitäten und Verhältnissen gegeben ist. In den achromatischen Fällen scheinen tatsächlich Adaptation, farbige Ermüdung oder ähnliches stattzufinden, denn LAND betont regelmäßig, daß das Bild nicht nur einfarbig, sondern "verwaschen", "nahezu farblos" aussähe. Danach wäre Adapta-

tion immer dann gegeben, wenn das Phänomen nicht eintritt.

Wahrscheinlich besteht ein fruchtbarer Ansatz überhaupt nur dann, wenn man den Begriff der Adaptation nicht gesondert auf das Problem der neutralen Farben anwendet, sondern allgemein als eine Umstrukturierung des gesamten Wahrnehmungsfeldes faßt. Jede Vorstellung, die auf eine Nivellierung des Feldes hinzielt, und dies trifft für viele Verwendungen des Begriffes Adaptation zu, kommt schon mit der vorhin gezeigten Tatsache in Widerspruch, daß bereits ein Abstand von zehn bis fünfzehn Schwellenwerten genügt, damit zwei Projektionslichter gewissermaßen zwischen sich die ganze Vielfalt von Farben ausbreiten können. Es müßte sich also nicht nur Umstrukturierung, sondern auch eine größere Differenzierung des Feldes ergeben.

Eins der auffälligsten Merkmale des beschriebenen Phänomens ist seine an Unbeweglichkeit grenzende Invarianz. Es liegt eigentlich sehr nahe, den Begriff der Adaptation für solche Prozesse auszuwerten, die das dynamische Gleichgewicht, das sich offenbar einstellt, aufrechterhalten. Dies hätte den wesentlichen Vorteil, daß Adaptationsvorgänge sich nicht auf Farbqualitäten, sondern auf die unproblematischere Intensitätsdimension beziehen würden.

3. Durch LANDs Untersuchungen entstandene Probleme

Es gibt eine ganze Reihe von Bedingungen, unter denen Farben wahrgenommen werden, die den Erwartungen widersprechen, die sich auf die Zuordnung von Farben zu Wellenlängen oder Gemische von Wellenlängen nach den Erfahrungen der Farbenmischung stützen.

Das LANDsche Phänomen ist nur eine von mehreren Erscheinungen solcher Art, aber es scheint eine Sonderstellung einzunehmen, weil es nicht nur besonders komplex ist, sondern auch in seiner Bedingungsstruktur bestimmte Ähnlichkeiten mit den Operationen der Farbenmischung zeigt. Ein Teil des

Problems der Beziehungen zwischen beiden wurde schon in den vorhergehenden Abschnitten deutlich.

Erklärungen, die sich auf Wirkungen von Kontrast und Adaptation stützen, sollen neue Tatsachen durch Vermittlung von Zusatzhypothesen auf die bekannten Regeln der Farbenmischung zurückführen. Gelingt dieser Versuch, so ließe sich das LANDsche Phänomen als ein Sonderfall des Entstehens von Farben in Mischungen verstehen. Gelingt er nicht, so stehen zwei Bedingungsstrukturen für das Entstehen von Farbwahrnehmungen nebeneinander. Tatsachen können sich nicht widersprechen, sondern nur die Folgerungen, die wir aus ihnen ziehen. Die theoretischen Begründungen der Farbenmischungen sollen später erörtert werden. Augenblicklich werden die Bedingungen der Farbenmischungen mit denen der im Vorigen beschriebenen Erscheinungen verglichen.

a) Beziehungen zu den Farbenmischregeln

Ein Vergleich des LANDschen Phänomens mit den Farbenmischungen zeigt als Augenfälligstes den Unterschied in der Zahl der Komponenten, die nötig sind, um alle Farbtöne durch Mischungen darstellen zu können einerseits und um das Phänomen zu erzeugen andererseits.

Für Mischungen gilt etwa folgende Regel: Man wählt drei beliebige Farben, von denen keine aus den zwei übrigen mischbar ist, und von denen keine die Komplementärfarbe einer der anderen ist.

Für die Herstellung des LANDschen Phänomens läßt sich eine viel einfachere Bedingung formulieren: es braucht nur ein farbiges und weißes Licht gegeben sein oder aber zwei farbige Lichter, die voneinander zehn bis fünfzehn ebenmerkliche Empfindungsunterschiede entfernt sind.

Um im LANDschen Phänomen ein "vollfarbiges Bild" zu erhalten, läßt sich keine so einfache Regel wie für die Farbenmischung angeben, es sei denn, man sieht die Tafel, welche die aus-

fallenden Farben für jede Kombination von Spektralfarben angibt (Abb. 2), als Angabe einer solchen Regel an.

Wie gezeigt worden war, müssen für das Eintreten des LANDschen Phänomens besondere Wahrnehmungsbedingungen gegeben sein. Dies gilt für Mischungen aber auch und zwar nicht allein für den speziellen Zweck der Normierung bestimmter Gemischsysteme, sondern ganz allgemein zur Entscheidung der Frage, wann Mischungen regelgerecht eintreten und wann das LANDsche Phänomen. Diese Frage wird im folgenden Unterabschnitt erörtert.

Vorläufig seien folgende Ähnlichkeiten zwischen Gemischsystemen und dem LANDschen Phänomen hervorgehoben:

1. Hier wie dort müssen gewisse Ausgangsfarben gegeben sein, die als Komponenten bestimmten Regeln unterworfen sind.
2. In beiden Fällen kann man das Ergebnis als Wahrnehmung oder den Farbort, der sich aus einer Kombination der Ausgangsfarben ergibt, vorhersagen. Die hierzu nötigen Meßoperationen sowie die geometrischen Anordnungen, die eine Vorhersage erlauben, sind verschieden und lassen sich auch nicht aufeinander zurückführen.
3. Ein Gemischsystem verhält sich invariant gegenüber linearen Transformationen. Vergleichbare geometrische Eigenschaften des Farbortesystems von LAND lassen sich nicht angeben, weil es kraft seiner Stabilität keine Varianten erkennen läßt, über deren Zusammenhang sich Regeln angeben ließen.
4. In beiden Fällen treten bei bestimmten Konstellationen von Ausgangsfarben verschiedene Sättigungsgrade der einzelnen Farben auf. Bei Gemischsystemen können wir diese genau vorhersagen, für das LANDsche Phänomen dagegen sind diese Verhältnisse noch gar nicht untersucht.

Der zweite und dritte Punkt hängen insofern miteinander zusammen, als die Vorhersagen über einen Farbort gerade mittels

der Eigenschaften erfolgen, die beide Anordnungen erst zu Systemen machen, über die sich Regeln angeben lassen. Wenn es keinen beliebigen Übergang von jedem einzelnen Gemisch zu einem anderen gäbe, der sich durch Transformationen beschreiben ließe, wäre eine Vorhersage nur möglich, wenn es eine vollständige Sammlung aller Fälle von Gemischen gäbe. Eine solche Vorhersage wäre natürlich unsystematisch.

Für das LANDsche Phänomen müßte ebenso eine Fallsammlung existieren, wenn wir nicht die Eigenschaften kennen würden, die es zum System machen. Wir kennen hier die Prozesse nicht, kraft derer es gleichgültig sein kann, ob wir uns beispielsweise auf Rot und Grün oder Orange und Gelb als Reizfarben beziehen, und wir können diese Prozesse auch nicht geometrisch als Transformationen beschreiben, weil das Farbortesystem anstelle von Transformierbarkeit Invarianz zeigt; aber wir kennen die allgemein geltende Meßregel für die Herstellung dieses Farbortesystems, aus dem sich dann Voraussagen ablesen lassen.

Es ist demgegenüber von untergeordneter Bedeutung, wie es sich mit der Sättigung oder ganz allgemein mit der Vollständigkeit der Farben, die sich einstellen, verhält. Es muß außerdem in Rechnung gestellt werden, daß wir aus den LANDschen Untersuchungen nicht schließen können, ob es überhaupt Lücken der Farbton- und Sättigungsreihe geben muß oder ob diese eine Nebenwirkung der photographischen Herstellung des Versuchsmaterials sein können.

b) Durch das Wahrnehmungsfeld gesetzte Bedingungen

Die Vorhersagen, von denen eben die Rede war, setzen immer Messungen an den als Reizen gegebenen Lichtern voraus. Diese Messungen kann man aber nur interpretieren, d.h. zu einer Vorhersage für eine Farbwahrnehmung machen, wenn man weiß, auf welchen Fall sie sich beziehen sollen. Es ist nämlich nicht ohne weiteres gegeben, ob man in einer Versuchssituation ein Gemisch oder das andere Phänomen beobachtet.

Es sei hier an den zu Beginn beschriebenen MAXWELLschen Versuch erinnert. Solange alle drei Projektoren in Betrieb sind, läßt sich eine Messung an der Leinwand unter gewissen nebensächlichen Einschränkungen als Gemisch ansehen. Sowie ein Projektor ausgeschaltet ist, wird jede Vorhersage, die sich auf eine Messung bezieht, die ein Gemisch voraussetzt, nicht mit der wahrgenommenen Farbe übereinstimmen. Daraus könnte man aufgrund der nunmehr bekannten Ergebnisse von LAND schließen, daß es sich um ein Phänomen dieser Art und nicht um eine Wahrnehmung handelt, die regelgerecht nach den Mischgesetzen vorhersagbar gewesen wäre. Diese Entscheidung läßt sich nicht visuell treffen, sondern nur aus dem Fehlschlagen der Vorhersage ableiten.

Unter den Versuchen, die LAND über "achromatische Situationen" (S. 19-20) angestellt hat, sind aber zwei, die zeigen, daß auch das Kriterium der Messung nicht zuverlässig ist. Diese Schwierigkeit bezieht sich auf den zweiten und dritten Versuch, in denen die Bildpunkte der in der beschriebenen Art und Weise wiedergegebenen Bilder auf Geraden liegen, die zu keiner Diagonalen parallel laufen. In beiden Fällen ist das Bild vollständig einfarbig. Daran sieht man zunächst, daß das LANDsche Phänomen nicht eingetreten ist. Beide Geraden beschreiben aber nicht ein bestimmtes konstantes Verhältnis, sondern schneiden jeweils ein ganzes Büschel von Strahlen, die verschiedene Intensitätsverhältnisse des roten und grünen Projektionslichtes darstellen, so daß man wenigstens das Erscheinen der Mischfarben hätte erwarten können. Die Einfarbigkeit der Bilder bedeutet also auch, daß keine Mischsituation eingetreten ist. Dadurch wäre auch jede Voraussage, die sich auf eine Messung der Intensitätsverhältnisse von rotem und grünem Licht stützt, nicht der Wahrnehmung gemäß ausgefallen.

Es ezigt sich also, daß die Wahrnehmungsbedingungen nicht nur für Voraussagen über das Eintreten des LANDschen Phänomens definiert sein müssen, sondern ebenso um entscheiden zu können, ob eine Mischsituation eintritt oder nicht.

Für die Verwirklichung der Mischsituation läßt sich aus der Lage der Meßpunkte im Farbortediagramm wieder eine zunächst rein formale Bedingung ableiten. Dazu seien die Versuche über achromatische Situationen nochmals betrachtet. Der erste Versuch gibt kein Kriterium ab, weil er in jeder Hinsicht "erwartungsgemäß" ausfällt. Es bleibt dabei aber zweifelhaft, welche Bedingungen dort tatsächlich realisiert sind, um die Einfarbigkeit hervorzurufen. Es kann sein, daß die aus den Regeln der Farbenmischung abgeleitete Vorhersage aus ganz anderen Gründen eintritt als denen, auf denen die Vorhersage aufgebaut war.

Der vierte und der fünfte Versuch, in denen die Mischfarben erwartungsgemäß erscheinen, haben gemein, daß alle möglichen Mischungsverhältnisse realisiert sind. In dem Versuch mit dem Positiv und dem Negativ des gleichen Bildes hat jedes Verhältnis die gleiche Intensitätensumme oder die gleiche Helligkeit. In dem Versuch mit den gekreuzten Graukeilen durchläuft jedes einzelne Mischungsverhältnis alle möglichen Intensitätensummen. Offenbar sind beide Bedingungen äquivalent in ihrer Wirksamkeit für das Eintreten von Wahrnehmungen gemäß der Erwartungen, die sich aus den Farbmischregeln herleiten.

Damit erfährt die unten ausgeführte Darstellung des Wahrnehmungsfeldes für den Versuch mit den gekreuzten Graukeilen eine Einschränkung. Zwar finden sich dort in jeder Richtung regelmäßig angeordnete Steigerungsreihen von ähnlichen Feldern, aber es gibt offenbar ausgezeichnete Reihenbildungen, die bestimmte andere Zusammenschlüsse unmöglich machen und wieder andere aufzwingen. Wenn das Wahrnehmungsfeld regelmäßig angeordnete Felder zeigt, die sowohl alle Verhältnisse als auch alle Intensitäten durchlaufen, schließen sich solche Felder zusammen, die gleiche Mischungsverhältnisse der Reizfarben enthalten. In anderen Fällen kommen zwar alle Verhältnisse vor, aber jedes einzelne nur in einer bestimmten Intensität und diese verschiedenen Intensitäten machen ein regelmäßiges Gefälle aus. Hier sondern sich dann nicht mehr die

Verhältnisse gegeneinander ab. Stattdessen bildet sich eine Reihe nach dem Intensitätsgradienten aus.

Die Ergebnisse des zweiten und dritten Versuches zeigen, daß solche Situationen einfarbig bleiben. Offenbar nivelliert ein Intensitätsgradient in bezug auf die Farbigkeit, indem er die Aussonderung von einzelnen Verhältnissen durch seine größere Organisationswirkung unterbindet. Statt der verschiedenen Mischfarben aus den Reizfarben entsteht eine einzelne Farbe, die lediglich nach Helligkeiten graduiert erscheint. Nimmt man hinzu, daß diese Situationen von LAND als "einfarbig bis nahezu farblos" bezeichnet werden, so wird man hierin die Auswirkung von "Adaptation" am ehesten vermuten können. Hier soll für die beschriebenen Vorgänge der Ausdruck "Nivellierung" verwendet werden.

Es ist bemerkenswert, daß solche Nivellierungen nur auftreten, wenn die Intensität oder Helligkeit das wirksame Moment für den Zusammenschluß der Bildpunkte ausmacht. Wenn aber alle Bildpunkte auf einer Geraden liegen, die nur eine Folge von Verhältnissen durchläuft bei konstanter Intensität, tritt keine Nivellierung ein. Wenn es eine "chromatische Adaptation" gibt, so müßte sie hier eigentlich ihren günstigsten Angriffspunkt finden. Es bildet sich aber bei diesem vierten Versuch kein achromatischer Punkt im Sinne einer Durchschnittsfarbe aus, sondern es treten nur die aus den Reizlichtern mischbaren Farben in Vollständigkeit auf.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß je nach Organisation des Wahrnehmungsfeldes entweder Nivellierung eintritt oder diejenigen Farben, die man nach den Mischungsregeln erwarten sollte oder schließlich das LANDsche Phänomen. Den verschiedenen Fällen entsprechen, wie es scheint, unterschiedliche Differenzierungsgrade. Warum aber ein Intensitätsgradient zu einer geringeren Differenzierung führt als ein Verhältnisgradient, läßt sich ohne weitere Versuche zunächst nicht klären.

Den größten Differenzierungsgrad des Wahrnehmungsfeldes er-

fordert offenbar das LANDsche Phänomen. Es war gesagt worden, daß die gleichzeitige Variation von Helligkeiten und Mischungsverhältnissen der Reizlichter die Bedingung für sein Auftreten darstelle mit dem Zusatz, daß das Wahrnehmungsfeld nicht regelmäßig nach Nähe und Ähnlichkeit für alle Bildareale aufgebaut sei. Nun läßt sich aber ohne weiteres sagen, daß diese Bedingung nicht so streng erfüllt zu sein braucht, daß jedes einzelne Areal sich von den andren unterscheiden müsse; denn schon bei der Beschreibung des Meßvorgangs (S. 6) war erwähnt worden, daß mehrere Meßpunkte eines Bildes gleiche Koordinaten haben würden und daß diese dann durch eine gemeinsame Farbe ausgezeichnet seien.

Es gibt also auch hier einen Zusammenschluß, der sich in gleicher Farbe verschiedener Bildareale ausdrückt. Es bilden sich demnach ebenso Gradienten aus. Offensichtlich muß es so viele geben, wie auf dem Bild verschiedene Farben vorhanden sind, und gerade diese Vielzahl wird den wesentlichen Unterschied zu den achromatischen Situationen, deren Bildpunkte alle auf einem Gradienten liegen, ausmachen.

Auch ist es offenbar nicht nötig, daß Bildpunkte mit gleicher Farbe genau gleiche Koordinaten haben; denn LAND unterscheidet auf dem Farnortediagramm beispielsweise zwischen Blau und Hellblau, und man kann mit einem Lineal leicht feststellen, daß diese nur nach Helligkeiten unterschiedenen Farben etwa auf Geraden liegen. Möglicherweise verlaufen diese Farbgradienten auf den Verhältnisstrahlen, aber das Farbortesystem ist nicht dicht genug, um darüber begründete Vermutungen anstellen zu können.

Nach welchen Gesichtspunkten sich Farbgradienten ausbilden, ist schwer zu sagen. Es muß einen Unterschied geben, der in der unregelmäßigen Anordnung der Bildpunkte liegt, so daß der Fall nicht eintreten kann, der bei der regelmäßigen Anordnung im Graukeil-Versuch offenbar ein hier wirksames Differenzierungsmoment zerstört.

c) Zusammenfassung und Fragen

Die gerade vorangegangenen Erörterungen zum Einfluß der Wahrnehmungssituation legen es nahe, den wirklichen Farbreiz von dem Einfluß anderer Bedingungen zu trennen. Es mag wieder daran erinnert werden, daß die Isolation eines Bildareals, indem man es durch einen Reduktionsschirm betrachtet, sicher die erwartete Reizfarbe wieder herstellt. Dies führt aber auch sofort auf die Frage, nach welchen Prinzipien diese Erwartung sich ergibt. Zunächst gilt, daß auch die Reizerwartung nach den Gesetzen der Farbenmischung an eine bestimmte Wahrnehmungsbedingung gebunden ist, die sich im Gegensatz zu dem Vorigen als Isolierung gegenüber Umfeldwirkungen definieren läßt. Dies führt auf die Frage, nach welchem Prinzip sich überhaupt eine bestimmte Wahrnehmungssituation auszeichnen muß.

Tatsächlich ist schon die Messung, die wir für die Vorhersage gemäß des einen oder anderen Falles vornehmen, unterschiedlich. Die Regel für das LANDsche Phänomen fordert eine solche, die außerörtliche Bedingungen von vorneherein berücksichtigt, indem man nämlich einen Punkt im Farbortesystem nur bestimmen kann, wenn vorher die hellsten Werte der beiden Projektionslichter auf dem Bild bekannt sind, die dann als Maßeinheit für jede einzelne Messung beider Meßreihen dienen.

Es wird also in dem einen Fall mit einer Feldwirkung der Wahrnehmungssituation gerechnet und im anderen Falle nicht. Dadurch ändert sich natürlich nicht die einzelne Reizsituation für einen bestimmten Punkt oder für das gesamte Bild in physikalischer Hinsicht, sondern nur ihre Funktion in bezug auf die Wahrnehmung. Es fragt sich im Wesentlichen, ob eine Zuordnung von Reiz zu Empfindung, die auf örtlichen Bedingungen beruht, gegenüber einer solchen, die auf außerörtlichen oder Feldbedingungen beruht, vorzuziehen ist.

Damit ist auch gefragt, ob man von den Bedingungen des "natürlichen Sehens" ausgehen will oder von einem "speziellen

Fall" des Sehens. Es ist ja dies gerade das hauptsächliche Argument von LAND, daß er seine Versuchsanordnung und die dort gegebenen Bedingungen für eine Nachbildung der Situation im "natürlichen Sehen" hält.

Sollte man aus bestimmten methodischen Gründen die Zuordnung nach örtlichen Kriterien für "wahrer" halten, so ist leicht zu sehen, daß die außerörtlichen Kriterien "allgemeiner" sein können. Wie schon erwähnt, ändern sich die wahrgenommenen Farben an jedem einzelnen Ort nicht wesentlich, wenn in der beschriebenen Versuchsanordnungen nach MAXWELL eines der drei Projektionslichter als Mischungskomponente entfernt wird. Es ändern sich aber die Reizerwartungen durch den Übergang von einer Bedingungsstruktur zu einer anderen. Aus diesem Umstand leitet LAND (1959 c) an einer Stelle die paradox wirkende Frage ab, worin überhaupt der wesentliche Beitrag einer dritten Komponente für das Farbensehen liege.

Im Prinzip wird man sagen müssen, daß sich sowohl die auf örtlichen Messungen aufbauenden Erwartungen auszeichnen lassen als auch die, die auf außerörtlichen Messungen beruhen. Wenn man die eine als "Täuschung" zugunsten der anderen bezeichnet, so läßt sich dies nur kraft übergeordneter oder weiterreichender Gründe entscheiden.

Es ist das Problem einer "Normalzuordnung" von Reiz zu Erlebnis, das sich bei Farben besonders schwierig gestaltet. Es gibt in der Variationsbreite der Abweichungen auf anderen Sinnesgebieten durchaus vergleichbare Fälle. So ist es beispielsweise ein fast unlösbares Problem, ob es eine natürliche Wahrnehmungssituation gibt, in bezug auf welche man einen bestimmten Größeneindruck von Dingen oder Lebewesen als "richtig" und einen anderen als "Täuschung" bezeichnen kann. Aber hier ist die Variation gewissermaßen auf eine Dimension oder Qualität beschränkt, während der Übergang von einer Farbe zu einer gänzlich verschiedenen etwas anderes ist als eine Veränderung des Helligkeitseindruckes einer Farbe unter verschiedenen Wahrnehmungsbedingungen.

Für Farben kommt noch ein Übriges hinzu. Wenn man beispielsweise wüßte, daß ein bestimmter Rezeptor nur für eine bestimmte Strahlung empfindlich wäre und sich bei gegebenem Reiz regelmäßig die Wahrnehmung Grün einstellen würde, so läge in diesem Wissen zweifellos eine Möglichkeit, eine Wahrnehmungssituation, in der diese Erwartung tatsächlich eintritt, vor anderen auszuzeichnen. Über ein solches Wissen verfügen wir aber nicht. Die Zuordnungen von Reizen zu Farbempfindungen sind überhaupt nur durch Vermittlung der Farbenmischgesetze zu treffen. Es liegt aber schon in den Gesetzen der Farbenmischung begründet, daß eine solche Zuordnung nicht eindeutig, aber bestimmbar existiert.

II. Die theoretischen Grundlagen der Farbenmischung

Von der Sache her gesehen ist es kaum zu rechtfertigen, die "Newtonsche Schwerpunktregel" und die "Grassmannschen Gesetze" als eine theoretische Grundlage für die Farbenmischung anzusehen. NEWTONs Regel ist ein geometrischer Satz und GRASSMANNs Ausführungen wollten gewisse Implikationen dieses Satzes begründen.

Tatsächlich stützen sich aber viele in der Weise auf die genannten Sätze, als verfüge man mit ihnen über irgendeine sachliche Grundlage, die es beispielsweise erlaubte, die Daten der Farbenmischungen als physikalisch begründete Vorgänge zu bezeichnen. Die folgenden Untersuchungen sollen darlegen, daß man sich nicht auf physikalische Grundlagen beruft, indem man sich auf NEWTON oder GRASSMANN stützt. Wenn man überhaupt an eine theoretische Grundlage denken will, die sich aus diesen Quellen herleiten ließe, so müßte sie psychologischer Natur sein.

Dies widerspricht dem Sinn, in dem diese Quellen von modernen Autoren eingeführt werden, sehr wesentlich. Deswegen sollen im folgenden möglichst viele Stellen wörtlich wiedergegeben werden. Vielleicht lassen sich damit zumindest einige historische Irrtümer ausräumen.

Der große Wert und die Bewährung dieser Regeln für die Empirie der Farbenmischung soll nicht angetastet werden. Weiterhin ist es gleichgültig, was NEWTON und GRASSMANN "wirklich" gemeint haben, entscheidend ist, was sich aus ihren Formulierungen ableiten läßt und was nicht.

1. NEWTONs Schwerpunktskonstruktion

Die erste Formulierung des Farbenmischgesetzes geht auf Isaac NEWTON zurück. Sie ist Ende des 17. Jahrhunderts ent-

standen und findet sich in seinem Werk über Optik. Die dort abgeleitete Schwerpunktkonstruktion zum Auffinden einer Farbe hat bis heute ihre Gültigkeit behalten. Auf diese Weise sind die Farbmischgesetze gleichsam in einem Atemzug mit den Grundlagen der modernen Physik formuliert worden. Die entscheidende Entdeckung der "Optik" war, daß weißes Sonnenlicht sich in einzelne homogene Lichter zerlegen läßt. Außerdem stellte NEWTON fest, daß diese selbst nicht weiter zu verändern sind. Während wir heute homogene Lichter durch ihre Wellenlängen bezeichnen, konnte NEWTON sie allein durch ein sinnlich wahrnehmbares Attribut, ihre Farbe, voneinander unterscheiden. Physikalisch gesehen maß er aber ausschließlich ihrer Brechbarkeit durch optische Medien und nicht ihrer Farbigkeit Bedeutung bei. NEWTON (1704) drückt dies unmißverständlich in der Form einer Definition aus:

> "Definition
> Das homogene Licht und die Strahlen, welche rot erscheinen, oder vielmehr welche die Gegenstände rot erscheinen lassen, nenne ich 'Rot erregende', die Lichtstrahlen, welche die Körper gelb, grün, blau und violett erscheinen lassen, Gelb erregende, Grün, Blau, Violett erregende usw. Und wenn ich einmal von Lichtstrahlen als farbigen oder gefärbten Strahlen spreche, so ist dies nicht wissenschaftlich oder im strengsten Sinne zu verstehen, sondern als gewöhnlicher, volkstümlicher Ausdruck, entsprechend der Vorstellung, die sich das gemeine Volk beim Anblick dieser Versuche bilden würde. Denn streng genommen sind die Strahlen nicht gefärbt; in ihnen liegt nichts, als eine gewisse Kraft und Fähigkeit, die Empfindung dieser oder jener Farbe zu erregen." (S.81)

Was brachte NEWTON zur Beschäftigung mit so subjektiven Erscheinungen, wie es die Farbenmischungen sind? Seine eigentliche Absicht bestand nur darin, die Unveränderlichkeit homogener Lichter gegen die vor seinen Entdeckungen gängigen Thesen zu sichern. Vorher vertrat man die Ansicht, daß Farben grob gesagt durch die Veränderungen entstünden, die das Licht in der Begegnung mit Körperoberflächen erleide. Diese These wäre durch NEWTONs Untersuchungen nur dann plausibel widerlegt gewesen, wenn alle Farben, die in der Welt vor-

kommen, Erscheinungen homogener Lichter wären. Nun gibt es aber einerseits Farben, die im Spektrum nicht vorkommen, und es gibt andererseits Farben, die von den Spektralfarben nicht unterscheidbar sind und sich dennoch zerlegen lassen. Um allen Einwänden solcherart begegnen zu können, definiert er die letztgenannten Farben als Gemische:

> "Prop. IV, Lehrsatz 3
> Durch Zusammensetzung können Farben entstehen, die zwar dem Augenscheine nach den Farben von homogenem Lichte gleichen, aber nicht hinsichtlich der Unveränderlichkeit der Farbe und der Konstitution und Natur des Lichts. Je zusammengesetzter diese Farben sind, umso weniger sind sie rein und intensiv, und bei zu viel Zusammensetzung können sie bis zum Verschwinden verwaschen und geschwächt werden, und die Mischung erscheint dann weiß oder grau. Durch Zusammensetzung können auch Farben entstehen, welche keiner homogenen Farbe ganz gleichen." (S. 85)

In einem folgenden Lehrsatz, der hier nicht wiedergegeben sei, wird festgestellt, daß alle unbunten Farben zwischen Schwarz und Weiß durch passende Mischung aus bunten Farben zusammengesetzt werden können. Diese beiden Lehrsätze enthalten im Wesentlichen alles, was zur Farbenmischung zu sagen wäre, um die These von der Unzerlegbarkeit homogener Lichter gegen mögliche Einwände zu sichern. NEWTON begnügt sich aber nicht damit, sondern gibt auch das Prinzip, nach dem Farben sich als Gemisch anordnen lassen, an.

Hier gilt das Interesse nun vor allem dem operationalen Gesichtspunkt, d.h. der Art und Weise, in der NEWTON seine Farbenmischregeln einführt. Diese kleine Abschnitt von knapp zweieinhalb Seiten (S. 99 - 102) beginnt mit folgender Überschreibung:

> "Prop. VI, Aufgabe 2
> In einer Mischung von primären Farben aus der gegebenen Quantität und Qualität jeder einzelnen die Farbe der Zusammensetzung zu finden."

Wesentlich ist, daß in diesem Zusammenhang die Mischfarbe nicht experimentell gefunden werden soll, sondern geometrisch

aus einem vorausgesetzten Modell. In vorhergegangenen Abschnitten waren Experimente über die Mischbarkeit von Farben beschrieben worden. Diese waren nicht induktiv in dem Sinne, daß das Auffinden des Farbenmischgesetzes auf experimentellem Wege abgeleitet worden wäre, sondern sie befaßten sich lediglich mit der Mischbarkeit von Farben überhaupt. NEWTON hat bei diesen Experimenten sowohl prismatisch gewonnene spektrale Lichter als auch Farbpulver verwendet.

Das Modell für die Ableitung der Schwerpunktkonstruktion wird unvermittelt eingeführt (Abb. 6):

> "Mit dem Radius OD beschreibe man einen Kreis um den Mittelpunkt O und teile seinen Umfang in sieben Teile DE, EF, FG, GA, AB, BC, CD, proportional den sieben musikalischen Tönen oder den Intervallen der acht in einer Oktove enthaltenen Töne." (S. 99-100)

Die Analogie zu den Tönen hat sich, wie wir heute wissen, als bedeutungslos erwiesen. Man mag sie als Relikt pythagoräischen Gedankengutes verstehen; die Intervalle geben etwa die phrygische Tonleiter wieder.

Die Lage der Grenzen zwischen den Farben hat NEWTON experimentell bestimmt. Er ließ dazu ein prismatisches Spektrum auf ein Blatt Papier fallen und forderte seine Versuchspersonen, deren "Augen für Unterscheidung von Farben schärfer waren", auf die Grenzen zwischen den Farben auf dem Papier zu markieren. Wir würden dies heute als einen psychophysischen Versuch nach dem Herstellungsverfahren bezeichnen.

Die Peripherie des Kreises enthält alle Farben des Spektrums. NEWTON bemerkt an anderer Stelle ausdrücklich, daß zwischen Rot und Violett Pupur läge, welches keine prismatische Farbe sei. Alle Farben gehen ineinander über, die Markierung von sieben Hauptfarben ist natürlich willkürlich. In der Mitte eines jeden Bogens der einzelnen Kreissektoren liegt sein Schwerpunkt. Um eine Mischung in dem Farbenkreis darzustellen, muß man den einzelnen Komponenten ihren Anteilen entsprechend größeres oder kleineres "Gewicht" zuteilen.

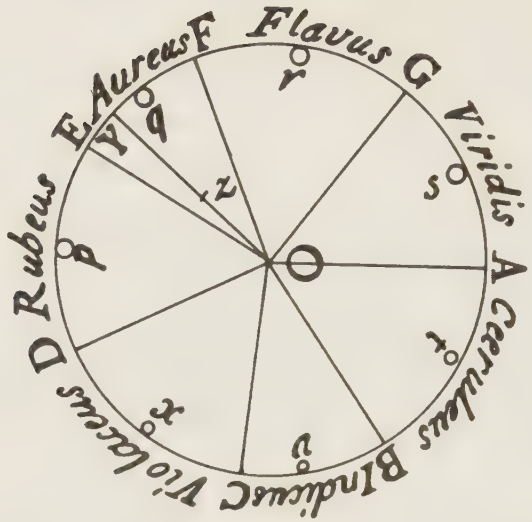


Abb. 6 (NEWTON 1704) Farbenkreis mit Mischungsbeispiel

Entlang der Peripherie sieben lateinische Farbnamen. Die Majuskeln A - G markieren die Grenzen zwischen den einzelnen Farben.

Der Mittelpunkt des Kreises (O) bezeichnet Weiß. Die Radien stellen, von der Peripherie aus betrachtet, Verweißlichung der einzelnen Farben bis zum vollen Weiß dar.

In der Mitte der einzelnen Kreissektoren sind kleine Kreise angebracht, die mit Minuskeln bezeichnet sind. Ihre Lage gibt den Schwerpunkt einer jeden Farbe wieder, ihre Größe ein bestimmtes Gewicht, das auf dem Schwerpunkt lastet.

Die Gewichte entsprechen Farbmengen. Die hier symbolisierten Mengen geben das auf S. 47 beschriebene Mischungsbeispiel wieder. Die Farbe in z ist das Ergebnis dieser Mischung.

NEWTON schreibt dies in folgender Weise vor:

> "... Um diese Schwerpunkte beschreibe man Kreise proportional der Anzahl der Strahlen jeder Farbe in der gegebenen Mischung, d.h. den Kreis p proportional der Anzahl der Rot erregenden Strahlen der Mischung, den Kreis q proportional der Menge der Orange erregenden Strahlen usw. Nun suche man den gemeinsamen Schwerpunkt all dieser Kreise p, q, r, s, t, u, x: er sei z, und ziehe vom Mittelpunkt des Kreises ADP durch z die gerade Linie OY bis zur Peripherie, so wird der Ort des Punktes Y in der Peripherie die Farbe anzeigen, die aus der Zusammensetzung aller Farben der gegebenen Mischung entsteht, und die Linie Oz wird der Sättigung oder Intensität der Farbe, d.h. ihrer Entfernung von Weiß proportional sein." (S. 100)

NEWTON führt anschließend noch ein Beispiel vor, in dem er den einzelnen Farben konkrete Gewichte zuordnet:

> "Ein Teil Violett, ein Teil Indigo, zwei Teile Blau, drei Teile Grün, fünf Teile Gelb, sechs Teile Orange und zehn Teile Rot...., dann finde ich den gemeinsamen Schwerpunkt z dieser Kreise und ziehe durch z die Linie OY; der Punkt Y fällt auf die Peripherie zwischen E und F, etwas näher an E als an F; daraus schließe ich, daß die aus diesen Ingredienzen zusammengesetzte Farbe ein Orange sein wird, das ein wenig mehr zu Rot als zu Gelb neigt. Ferner finde ich, daß Oz etwas kleiner ist, als 1/2 OY, und daraus schließe ich, daß dieses Orange etwas weniger als halbsoviel Intensität besitzt, wie ein nicht zusammengesetztes Orange, d.h. ein Orange, wie es durch Mischung eines homogenen Orange mit einem guten Weiß im Verhältnisse der Linie Oz zu zY entstehen muß, wobei dieses Verhältnis sich nicht auf die Mengen des gemischten orangenen und weißen Pulvers, sondern auf die Mengen des von ihnen reflektierten Lichts bezieht." (S. 101-102)
> (Abb. 6 gibt dieses Beispiel wieder.)

In seiner zusammenfassenden Darstellung des gegenwärtigen Standes der Farbenlehren zitiert C.H. GRAHAM (1959) ohne Quellenangabe ein bezeichnendes Diktum über NEWTONs Erfindung des Farbenmischgesetzes: "Das erste fruchtbare Schema für die Systematisierung der Tatsachen der Farbenmischung ist von NEWTON aufgestellt worden. NEWTONs Ideen haben sich nicht als Gipfel einer langen historischen Entwicklung

eingestellt. Vielmehr scheinen sie einen imaginativen 'Sturz ins Ungewisse', eine schamlose Spekulation darzustellen."

Worin besteht nun das Abenteuerliche, bzw. die "schamlose Spekulation" in seinem Vorgehen? Wenn wir heute eine Farbordnung aufstellen, so geschieht dies aufgrund der NEWTONschen Schwerpunktkonstruktion. Die Rationalität einer Farbenordnung ist eben durch sie als Anordnungsprinzip gegeben. NEWTON geht genau den umgekehrten Weg, indem er die Farbordnung voraussetzt und aus ihr die Gültigkeit der Schwerpunktkonstruktion ableitet. Dies ist überhaupt nur möglich, wenn man von gewissen Zusammenhängen ausgeht, die die Farben als Phänomene und nicht als Lichter im physikalischen Sinn haben. Dies ist angesichts unserer heutigen Vorstellungen abenteuerlich.

Es liegt auf der Hand, daß die von NEWTON vorausgesetzte Farbenordnung gar nicht von physikalischen Größen herleitbar ist. Zunächst besaß NEWTON überhaupt kein Maß, um farbige Lichter anders als durch ihre Brechbarkeit physikalisch unterscheiden zu können. Ebenso konnte er Intensitäten nicht exakt angeben. Damit war er ohnehin auf seine Wahrnehmungen angewiesen und nach diesen hat er die Farben angeordnet. Eine Anordnung nach Wahrnehmungen würden wir heute als intraphänomenal bezeichnen und meinen damit, daß die Anordnungskriterien sich allein aus Beziehungen zwischen Phänomenen ergeben.

Der erste naheliegende Schritt in diesem Sinne ist sicherlich die Anordnung der Farben in Kreisform. Dies ist nur berechtigt, wenn man die Ähnlichkeit der Anfangs- und der Endfarbe des Spektrums berücksichtigt. Ist eine solche Kreisform gegeben, so bietet sich als nächster Schritt an, das farblose Weiß in die Mitte des Kreises zu legen; denn Weiß ist phänomenal dadurch ausgezeichnet, daß es sich von allen bunten Farben in etwa gleicher Weise unterscheidet.

Unveröffentlichte Untersuchungen, die im Tübinger Psychologischen Institut durchgeführt wurden, zeigen, daß bereits Kinder im Alter von vier Jahren einen Farbenkreis aus vor-

gebenen Farbtäfelchen in richtiger Anordnung legen konnen. (R.E. WEBER, 1954)

Überraschend ist, daß NEWTON von einer solchen Ordnung ausgehend das gesetzmäßige Verhalten von Farben in Mischungen herleiten konnte. Diese Beziehungen werden durch die Schwerpunktkonstruktion wiedergegeben, welche einen regelhaften Zusammenhang zwischen Intensitäten und Farborten beschreibt. Es ist außerdem interessant, daß NEWTON dieser so abgeleiteten Operation mit einigem Erfolg empirische Relevanz zuschreiben konnte.

Die geometrische Abbildung des Farbsystems ist vollständig, indem sie alle möglichen Farbpunkte enthält. Bringt man also z.B. zwei Farben, die durch bestimmte Stellen auf der geometrischen Farbentafel repräsentiert sind, gemäß der Konstruktion in irgendein "Gewichtsverhältnis", so wird der daraus resultierende Schwerpunkt einen bereits vorgegebenen Farbort bezeichnen. Auf diese Weise ergibt sich sofort eine theoretische Aussage über die resultierende Farbe.

Dies unterscheidet sich von der Art, in der wir heute eine Farbtafel aufbauen würden, wesentlich. Stellen wir dort z.B. zwischen drei Lichtern ein bestimmtes Intensitätsverhältnis her, so ermitteln wir den Ort der resultierenden Farbe mit Hilfe des Urteils von Versuchspersonen. Dieses Vorgehen ist im Gegensatz zu den Operationen auf der NEWTONschen Farbentafel empirisch.

Unsere heutigen Farbengleichungen von der Form $F = aA+bB+cC$ bezeichnen psychophysische Gleichungen, wobei F die von der Versuchsperson durch Gleichurteil zu bestimmende Farbe bedeutet und die andere Seite der Gleichung ein bestimmtes Verhältnis der Ausgangsreize. Eine der Form nach identische Farbgleichung, die sich auf NEWTONs Farbenkreis bezieht, wäre rein intraphänomenal zu verstehen.

Innernalb NEWTONS "Optik" ist die Einführung der Schwerpunktregel eine Episode von verhältnismäßig geringem Gewicht. Dieser Gegenstand wird schnell wieder verlassen, nachdem ein

letzter Lehrsatz formuliert worden ist:

> "Prop. VII, Lehrsatz 5.
> Alle Farben in der Welt, die durch Licht erzeugt sind und nicht von unserer Einbildungskraft abhängen, sind entweder Farben homogenen Lichts oder aus solchen zusammengesetzt, und zwar entweder genau, oder ganz annähernd nach der Regel der vorhergehenden Aufgabe." (S. 102)

NEWTON hat sein Modell durch das Ergebnis von Mischungen annähernd bestätigt gefunden, er hat aber nicht gezeigt, daß für seine Gültigkeit unerläßliche Voraussetzungen wirklich erfüllt waren.

2. Die Grassmannschen Gesetze

GRASSMANN (1853) versucht, den Entwurf von NEWTON auszubauen. Der Farbenkreis wird von ihm übernommen. Die einzige Änderung, die nach seiner Meinung anzubringen ist, besteht in einer empirischen Bestimmung der Abstände der Farben durch eine "einfache aber vollständige Beobachtungsreihe". NEWTON hatte die Farben nach der Analogie einer Tonleiter angeordnet.

GRASSMANN beginnt seine Abhandlung mit einem an HELMHOLTZ adressierten Satz:

> "Daher möchte es nicht überflüssig sein zu zeigen, wie die NEWTONsche Theorie der Farbenmischung bis zu einem gewissen Punkte hin, und namentlich der Satz, daß jede Farbe ihre Komplementärfarbe hat, welche mit ihr vermischt Weiß liefert, aus unbestreitbaren Tatsachen mit mathematischer Evidenz hervorgeht, so daß dieser Satz als einer der wohlbegründetsten in der Physik angesehen werden muß." (S. 69)

HELMHOLTZ (1851) hatte nämlich in einer frühen Untersuchung bestritten, daß man zu jeder Farbe eine andere fände, die mit ihr gemischt Weiß ergäbe. Für GRASSMANNs Auffassung von NEWTONs kurzem Intermezzo über Farbenmischungen ist zunächst bemerkenswert, daß er es als "Theorie" bezeichnet, und daß er aus dem Farbenkreis von NEWTON mit mathematischer Evidenz physikalische Sätze folgen lassen will.

Die Existenz einer Komplementärfarbe zu jeder beliebigen anderen Farbe ist nun gewiß kein physikalischer Satz und NEWTON hat ihn auch nicht als solchen angesehen. NEWTON bemerkt lediglich im Hinblick auf seinen Farbenkreis, daß Mischungen zwischen zwei gegenüberliegenden Farben zu gleichen Verhältnissen in das Zentrum des Kreises, also auf den Unbuntpunkt fallen. Er ist sich aber offenbar dessen bewußt, daß der Farbenkreis ein geometrisches Bild subjektiver Qualitäten darstellt.

Für NEWTON waren alle Farben subjektiv (Rot erregend usw.). Seine Theorie geht nicht über die Tatsachen, die sich beispielsweise bei Dispersion ergeben, hinaus. Die Farbenmischungen werden nur eingeführt, um gleichsam eine ständige Täuschung durch unsere Sinnesorgane aufzudecken, die uns durch farbige Erscheinungen den Eindruck vermitteln möchten, es gäbe mehr und andere Lichtstrahlen als diejenigen, die durch ihre bestimmte Brechbarkeit und weitere Unveränderlichkeit definiert sind.

Die Vermengung der Ebenen, der GRASSMANN anheimfällt, hat sich bis zu einem gewissen Grade bis in die Gegenwart erhalten. Es ist dabei nicht schlimm, daß phänomenologische Sätze als physikalische bezeichnet werden. Scheinprobleme verwirrender Art entstehen erst, wenn man diese phänomenologischen Sätze physikalisch zu begründen sucht.

Es wird im allgemeinen nicht gesehen, daß auch GRASSMANNs Formulierungen eindeutig auf phänomenale Tatbestände zurückgehen. Er beruft sich stets auf Beobachtungen und meint damit keine physikalischen Operationen, sondern Beobachtungen an den Phänomenen. GRASSMANN berichtet nicht von Experimenten, sondern er stellt fest, welche durch Beobachtung zugänglichen Eigenschaften Farben haben müssen, um den NEWTONschen Ansatz rechtfertigen zu können. Er formuliert seine Sätze gewissermaßen als Axiome, aus denen man dann NEWTONs Thesen folgen lassen kann.

GRASSMANNs erste Betrachtung dient dazu, die NEWTONsche An-

ordnung der Farben zu rechtfertigen. Die Peripherie des Farbenkreises stellt alle spektralen, also voll gesättigten Farben dar. Zum Zentrum hin bekommt jede Farbe eine stetig ansteigende Beimischung von Weiß. Außerdem läßt sich jeder Farbe als ein Mehr oder Weniger eine bestimmte Intensität zuordnen. Entsprechend muß das Auge an jeder Farbe drei Momente unterscheiden können. Das erste GRASSMANNsche Gesetzt lautet wörtlich:

> "Die wissenschaftliche Bezeichnung, welche dieser populären Nomenklatur substituiert werden muß, ergibt sich aus dem Obigen von selbst, indem jeder Farbeneindruck der genannten Art sich in drei mathematisch bestimmbare Momente zerlegt: den Farbenton, die Intensität der Farbe und die Intensität des beigemischten Weiß." (S. 70)

GRASSMANN hatte vorher den Sprachgebrauch für die Unterscheidung dieser drei Farbqualitäten erörtert. Sein Übergang zu einer wissenschaftlichen Nomenklatur besteht also eigentlich nur in der Zuordnung von physikalischen Maßbegriffen.

Systematisch gesehen liefert diese erste Voraussetzung eine Begründung für die Anordnung der Farben in Kreisform. GRASSMANN hebt besonders hervor, daß ein direkter Beweis für die These von den drei unterscheidbaren Momenten schwer zu führen sein, daß aber noch kein Beobachter ein weiteres Moment, welches den Farbeneindruck bestimme, angegeben habe.

Das nächste GRASSMANNsche Gesetz lautet:

> "das zweite, was wir voraussetzen, ist: 'daß, wenn man von den beiden zu vermischenden Lichtern das eine stetig ändert (während das andere unverändert bleibt), auch der Eindruck der Mischung sich stetig ändert.'" (S. 72)

Bis auf das bereits wiedergegebene erste Gesetz hebt GRASSMANN seine Sätze oder Definitionen durch Einrücken im Text und Anführungszeichen hervor.

Es muß wieder hervorgehoben werden, daß der Satz dem Inhalt nach rein phänomenal zu verstehen ist. Er soll bedeuten, daß die phänomenale Farbordnung keine Lücken und Sprünge aufweist.

Aus dieser Tatsache und der zyklischen Form der Farbtafel wird z.B. die notwendige Existenz von Komplementärfarben abgeleitet.

Es gibt einerseits stetige Mischreihen von einer Farbe zu Weiß und andererseits stetige Übergänge von jeder Farbe zu den übrigen entlang der Peripherie des Kreises. Dieser Übergang ist in zwei Richtungen möglich. Durch Überlegung kommt GRASSMANN zu dem Schluß: "Aus diesen Voraussetzungen nun läßt sich der folgende Satz mit mathematischer Evidenz ableiten:

> "Es gibt zu jeder Farbe eine andere homogene Farbe, welche, mit ihr vermischt, farbloses Licht liefert.'" (S. 73)

Dies ist ein Folgesatz und keines seiner eigentlichen Gesetze. Dieser Folgesatz wird geometrisch bewiesen. Seine Erörterung nimmt übrigens zusammen mit der Auseinandersetzung mit der eingangs erwähnten These von HELMHOLTZ den breitesten Raum in der ganzen Abhandlung ein.

Im Unterschied zu dem ersten Gesetz, welches nur die Anordnung der Farben begründet, ist der eigentliche Stetigkeitssatz ein geometrisches Axiom, das für die später einzuführende Vektoraddition unerläßlich ist.

Das dritte Gesetz ist das wichtigste. GRASSMANN selbst nennt es den "Hauptsatz der Farbenmischung". Es lautet:

> "daß zwei Farben, deren jede konstanten Farbenton, konstante Farbenintensität und konstante Intensität des beigemischten Weiß hat, auch konstante Farbenmischung geben, gleich viel aus welchen homogenen Farben jene zusammengesetzt seien." (S. 78)

Dieser Satz beinhaltet zunächst nur eine schlichte Erfahrungstatsache die Farbwahrnehmung betreffend. Mit seiner Richtigkeit steht und fällt aber die NEWTONsche Theorie der Farbenmischung. Es geht hier nicht um die Anordnung der Farben, sondern um ihr rationales Verhalten in Mischungen. Nur wenn Farben sich so verhalten, wie GRASSMANN es hier fordert,

kann man die Schwerpunktkonstruktion auf Mischungen anwenden, nur dann kann man mit Farben rechnen oder geometrische Konstruktionen durchführen, die sich auf sie beziehen.

Die Bedeutung dieses Satzes ergibt sich aus seiner geometrischen Explikation. Zunächst wird auf einem Farbenkreis (Abb. 7) eine einzelne beliebige Farbe a festgelegt. Nach dem, was vorher gesagt worden ist, muß sich die dazu gehörige Komplementärfarbe a' "durch Beobachtung" finden lassen können. Beiden Farben werden einander entgegengesetzte Radien zugeordnet. Dann wird eine Farbe b gesucht, die ebenfalls auf der Kreisperipherie rechtwinklig zu den beiden anderen liegt. GRASSMANN behauptet, dies müsse diejenige Farbe sein, die sowohl mit a einerseits als auch mit a' andererseits gemischt in beiden Fällen gleichviel Weiß ergäbe. Diese Operation soll jedenfalls eine Symmetriebeziehung zwischen a und a' definieren. Zu b wird entsprechend b' gefunden und beiden in der gleichen Weise wie vorher zwei Radien zugeordnet. Jedem Punkt auf diesen Radien soll eine bestimmte Intensität korrespondieren.

Es wird also von einer einzelnen Farbe ausgehend, ein orthogonales Koordinatensystem aufgebaut. Nun kann man durch Vermischung von je zweien dieser vier Farben, die jeweils eine Achse des Koordinatensystems festlegen, die zwischen ihnen liegenden durch Mischungen herstellen. Jeder so gefundenen Farbe entspricht ein Intensitätsverhältnis ihrer Ausgangsfarben. Nun ist nach GRASSMANNs Konstruktionsanweisung die "geometrische Summe" der beiden die Intensitäten darstellenden Strecken auf den Radien der Ort der Mischfarbe. Die Länge der Diagonalen stellt die Intensität der neuen Farbe dar und ihre Richtung den Farbenton. GRASSMANN beschreibt hier also eine Vektoraddition.

Ist auf diese Weise der Ort für alle Farben festgelegt, braucht man künftig nicht mehr zu mischen, sondern kann von beliebigen Punkten ausgehend den Ort der zugehörigen Mischfarbe durch Vektoraddition finden. GRASSMANN begründet diese

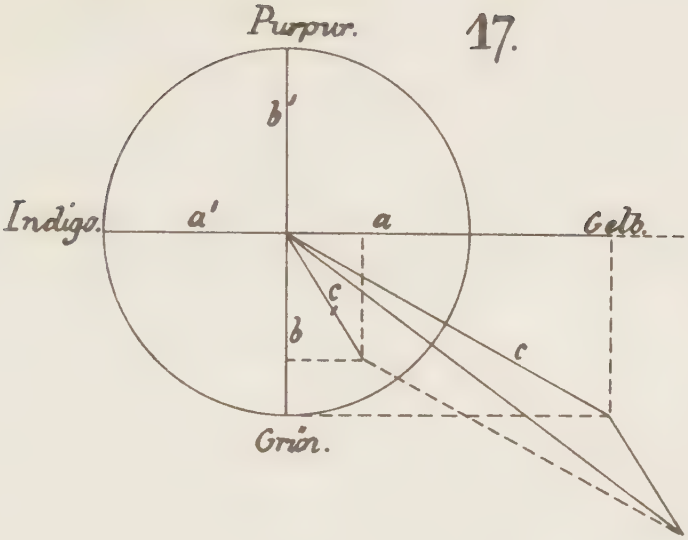


Abb. 7 (GRASSMANN 1853) Darstellung eines Gemisches durch Konstruktion der "geometrischen Summe" zweier Strecken.

Die Radien a und b stellen Gelb und Grün dar, a' und b' die dazu komplementären Farben Indigo und Purpur. Die Strecken c und c_1 bezeichnen Farben, deren Mischung gesucht wird. Sie sind durch den Kreismittelpunkt und Abschnitte der Radien a und b bestimmt. Die Größen der Abschnitte geben die Intensitäten von Gelb und Grün wieder.

Die gesuchte Mischfarbe ist durch Konstruktion zu finden. Zu c wird eine Parallele durch c_1 und zu c_1 eine Parallele durch c gezogen. Der Schnittpunkt der Parallelen gibt den Ort der gesuchten Farbe an. Sein Abstand vom Kreismittelpunkt stellt die Intensität der Mischfarbe dar.

Konstruktion aufgrund des Assoziativgesetzes bezüglich der Vektorkomponenten, indem er darauf abhebt, daß "die Ordnung, in welcher man geometrisch addiert (die Kräfte zusammensetzt), gleichgültig ist für das Resultat." (S. 80)

Die oben genannte Abb. 7 enthält ein Beispiel, an dem GRASSMANN das Gesagte demonstriert. Die durch die beiden Strecken c und c_1 dargestellten Farben sollen gemischt und der Ort ihrer Mischung gefunden werden. Dieser ist der Endpunkt der Diagonalen des Parallelogramms, dessen Seiten c und c_1 sind. Es läßt sich aber die Strecke c aus den beiden Radien a und b und die Strecke c_1 aus den auf den Radien liegenden Teilstrecken a_1 und b_1 zusammensetzen.

Abweichend von der GRASSMANNschen Bezeichnung sollen hier für Richtungen große lateinische Buchstaben eingeführt werden. Diese entsprechen den Radien. Für Intensitäten, also bestimmte Strecken auf diesen Radien, werden kleine lateinische Buchstaben verwendet. Dies ist im Gegensatz zur üblichen Bezeichnung von Vektoren die in der Farbenlehre gebräuchliche Art der Kennzeichnung.

Die Mischfarbe der Strecken c und c_1 läßt sich jetzt ebenso als Summe der beiden Ausdrücke $(a + a_1) A$ sowie $(b + b_1) B$ darstellen. Wenn man jetzt schreibt $(a + a_1) A + (b + b_1) B$, so ist dies dem Ausdruck $(aA + bB) + (a_1A + b_1B)$ äquivalent. GRASSMANN definiert also die Farbenmischung als Vektoraddition. Dies ist bis heute üblich geblieben. Wenn die Vektoren sich auf einen physikalischen Raum als Intensitäten und Wellenlängen beziehen ließen, wären GRASSMANNs zweiter und dritter Satz als formale Voraussetzungen überflüssig. Weil diese Operation sich aber auf den phänomenalen Farbraum bezieht, mußte vorher festgestellt werden, ob sich Farben als anschauliche Gegebenheiten in Mischungen stetig verhalten und ob ihr Aussehen einen zuverlässigen Schluß auf ihren Ort im Farbsystem erlaubt.

Die für die ganze Ableitung wesentlichste Voraussetzung ist natürlich, daß die Vektoraddition sich im Ergebnis mit empi-

rischen Mischungen deckt; aber dies nimmt GRASSMANN zu Recht als gegeben hin. Er macht nur die noch weiter zurückliegende Voraussetzung explizit, daß der durch Mischung bestimmte Ort im Farbraum nur durch das Aussehen eines Gemisches unabhängig von seiner besonderen Zusammensetzung bestimmbar sein muß. Indem er die besondere Zusammensetzung einer Farbe durch die Komponenten eines Vektors beschreibt, kann er für das Aussehen jeder Mischung die Gültigkeit des Assoziativgesetztes voraussetzen. Es gilt somit allgemein für die Komponenten eines Vektors, der die Zusammensetzung einer beliebigen Farbe beschreibt, $a + (b + c) = b + (a + c)$.

Eine Mischfarbe ist deswegen nur durch die Farbwahrnehmung in ihrem Verhalten bestimmbar, weil es kein direktes physikalisches Äquivalent für sie gibt. Aus der Mischung zweier Wellenlängen entsteht keine neue Wellenlänge, sondern es entsteht eine Mischfarbe, ein Phänomen. Daran ändert auch die Tatsache nichts, daß wir den Ort einer solchen Mischfarbe durch das im physikalischen Maß gemessene Intensitätsverhältnis der Ausgangsfarben festlegen können.

Nur wenn das System der phänomenalen Aussagen, die wir nur von Versuchspersonen erhalten können, in sich konsistent ist, lassen sich die physikalischen Variablen in eine sinnvolle Beziehung zueinander setzen. Nimmt man an, das Grassmannsche Gesetz würde nicht gelten und es gäbe Farben, die bei gleichem Aussehen gemischt verschiedene Gemische hervorbrächten, so wäre unmittelbar einsichtig, daß ihnen trotz des gleichen Aussehens in unbestimmbarer Weise auch verschiedene Orte auf der Farbtafel zukommen müßten. Geometrische Darstellungen der Farbenmischung wären dann unmöglich.

GRASSMANN stellt im Folgenden dar, daß sich die Intensitäten statt in Streckenlängen auch als Schwerpunkte im Sinne des NEWTONschen Farbenkreises darstellen lassen. Hier entspricht der Strecke von der Peripherie des Kreises zum Zentrum hin eine stetige Zunahme von Weiß und keine Variation der Intensität. Um diese Beimischung von Weiß fassen zu können, wird ein vierter und letzter Satz eingeführt:

"daß die gesamte Lichtintensität der Mischung die Summe sei aus den Intensitäten der gemischten Lichter." (S. 82)

GRASSMANN bezieht sich hier auf einen Vorgang, der dem oben zitierten Mischbeispiel von NEWTON entspricht. Dort wurde a dem aus der Mischung resultierenden Orange die Farbintensität von der Weißintensität unterschieden. Um diese Unterscheidung geometrisch fassen zu können, genügt nicht die durch das bloße Intensitätsverhältnis faßbare Richtung, sondern es muß noch die Summe der auf den Schwerpunkten lastenden Gewichte hinzukommen, die dann nach Farb- und Weißanteil differenziert werden.

Dieser letzte Punkt von GRASSMANNs Erörterungen sei hier nicht weiter verfolgt. Es ist aber erwähnenswert, daß er selbst seinen vierten Satz für am wenigsten begründet hält, weil er sich nicht auf Beobachtungen gründet, sondern sich lediglich aus theoretischen Erwägungen als wahrscheinlichste Annahme legitimiert. Es verhält sich bis heute nicht anders mit dem problematischen "Additivitätstheorem der Helligkeiten".

Bemerkenswerterweise enthalten GRASSMANNs Darstellungen nicht den geringsten Hinweis auf Möglichkeit oder Notwendigkeit von Dreifarbenlehren. Um es ganz unmißverständlich auszudrücken: Das Wort "drei" kommt im Zusammenhang mit Farbenmischungen an keiner Stelle dieses Textes vor.

Es war versucht worden, aus dem Referat der GRASSMANNschen Abhandlung deutlich zu machen, daß sich seine vielzitierten Gesetze sämtlich auf das Farbsystem als ein solches von Farbwahrnehmungen beziehen. Sie sind mit Postulaten identisch, die an jede andere Mannigfaltigkeit von Phänomenen, die psychometrisch skaliert werden soll, zu richten sind. Es geht hier wie in jedem Fall um die gleiche Frage, ob beispielsweise Axiome der Ordnung, Stetigkeit, Monotonie, Assoziativität o.a. erfüllbar sind.

Diese ganzen Fragen werden in bezug auf die Farbreize, also hinsichtlich physikalischer Maßstäbe im allgemeinen gar nicht gestellt, weil physikalische Maße von vornherein so konstruiert werden können, wie die Axiome des Messens es erfordern. Es ist ein sehr großes Verdienst von GRASSMANN, überhaupt erkannt zu haben, daß man im Falle von Farben nicht einfach physikalisch mißt, sondern mit phänomenologischen Voraussetzungen arbeitet, deren rationales Verhalten nicht ohne weiteres gegeben war. In diesem Sinne kann man die Grassmannschen Gesetze nur als Feststellungen über die metrischen Eigenschaften eines phänomenalen Systems auffassen.

3. Die Grundlagen des Dreifarbensatzes

a) Historische Entwicklung

Es ist eine wichtige und für die gesamte Farbenlehre folgenreiche Tatsache, daß man von drei richtig gewählten Farben ausgehend, die ganze Mannigfaltigkeit der übrigen durch Mischungen darstellen kann. Dies ist den Malern seit altersher bekannt und steht mit der Entwicklung des Farbenmischgesetzes durch NEWTON in keinem unmittelbaren Zusammenhang. Weder NEWTON noch GRASSMANN nehmen auf diesen Umstand Bezug, obgleich er ihnen mit großer Wahrscheinlichkeit bekannt war.

Erst nachdem der britische Physiker Thomas YOUNG die Dreikomponentenmischung zu einer physiologischen Hypothese auswertete, gewann sie zunehmend an Bedeutung. YOUNG bezweifelte nämlich, daß das Sehorgan zwischen einer großen Anzahl von Wellenlängen unterscheiden könne und nahm stattdessen nur drei für verschiedene Wellenlängen empfindliche Rezeptoren an. Er ordnete diesen zunächst die drei Malerfarben zu, änderte dann aber die Grundempfindungen in Blau, Grün und Gelb.

Wenn nun für jede Wellenlänge, die diesen Farben entspricht, eine Rezeptorart besonders empfindlich ist, werden verschiedene Farbreize diese Rezeptoren in jeweils verschiedenem

Zusammenklang reizen. Jedem Farbreiz entspricht so ein bestimmtes Erregungsgemisch und man kann sich vorstellen, daß auf diese Weise nach dem Modell der Farbenmischungen alle möglichen Farbempfindungen entstehen könnten.

Cl. MAXWELL nahm im Jahre 1855 die erste experimentelle Prüfung von NEWTONs Gesetz vor. Er berief sich bereits ausdrücklich auf die YOUNG sche Hypothese:

> "Ich gehe jetzt zu der geometrischen Form über, in welche man die Theorie kleiden kann. Es sei angenommen, daß den drei reinen Empfindungen die Farben Rot, Grün und Violett entsprechen, und daß wir die Intensitäten jeder dieser Empfindungen zahlenmäßig abschätzen können.
>
> Es seien v, r, g die Winkelpunkte eines Dreiecks und wir betrachten die Empfindungen diesen Punkten zugeordnet. Wenn wir eine Maßzahl für die roten, grünen und violetten Anteile der Empfindungen für eine bestimmte Farbe finden, und dann die Gewichte dieser Anteile bei r, g und v anordnen und weiter den Schwerpunkt dieser drei Gewichte in der üblichen Art finden, dann wird dieser Punkt der Ort der gegebenen Farbe sein und die Maßzahl seiner Intensität wird die Summe der drei Empfindungen darstellen."
> (zit. nach C.H. GRAHAM, 1959, S. 268)

Weltweit bekannt wurde die YOUNGsche Hypothese aber erst durch Hermann von HELMHOLTZ, der sie in seiner "Physiologischen Optik" mit Nachdruck vertrat. Als YOUNG-HELMHOLTZsche Theorie ist sie bis heute die einflußreichste geblieben, ohne daß es ihr gelungen wäre, die Erscheinungen des Farbensehens lückenlos aufzuklären. Genauso wie MAXWELL führt auch HELMHOLTZ den Dreifarbensatz als physiologische Hypothese in die Farbenmischungen ein, indem er sich auf Thomas YOUNG beruft. Seine Position in dieser Frage geht aus den folgenden Sätzen eindeutig hervor:

> "Wenn wir von BREWSTERs Hypothese (in diesem Zusammenhang unwesentlich, d.Vf.) absehen, hat es überhaupt keinen Sinn, in objektiver Bedeutung von drei Grundfarben zu sprechen. Denn so lange es auf rein physikalische Verhältnisse ankommt und das menschliche Auge aus dem Spiel bleibt, sind die Eigenschaften des gemischten Lichts

> immer nur abhängig von den Mengenverhältnissen, in denen das Licht sämtlicher einzelner Wellenlängen darin vorkommt. Eine Reduktion der Farben auf drei Grundfarben kann immer nur subjektive Bedeutung haben, es kann sich nur darum handeln, die F a r b e n e m p f i n d u n g e n auf drei G r u n d e m p f i n d u n g e n zurückzuführen. In diesem Sinne hat TH. YOUNG das Problem richtig aufgefaßt, und in der Tat gibt seine Annahme eine außerordentlich einfache und klare Übersicht und Erklärung sämtlicher Erscheinungen der physiologischen Farbenlehre."
> (HELMHOLTZ, 1911, S. 119)

Es geht HELMHOLTZ hier, wie man sieht, um das physiologische Verständnis der Farbenmischungen und nicht etwa um eine Begründung des Dreifarbensatzes als "objektiv" oder "notwendig". Es gibt aber andere Bemerkungen von HELMHOLTZ, die keinen Zweifel über seine eben festgelegte Position erlauben, aber verstehen lassen, wie sich gewisse "moderne Fassungen" der Grassmannschen Gesetze ergeben haben, in denen der Dreifarbensatz vielfach an erster Stelle und als ein wesentlicher Bestandteil fungiert.

Vorher, anläßlich der Besprechung verschiedener Erscheinungen, die beim Mischen von Farben auftreten, war HELMHOLTZ schließlich zu der Feststellung gekommen, daß "die Qualität eines Farbeneindruckes von drei veränderlichen Größen abhängt, nämlich der Lichtstärke, dem Farbenton und seinem Sättigungsgrade." Es sind die gleichen Merkmale, die auch GRASSMANN angegeben hatte. Diesen substituiert HELMHOLTZ ebenfalls physikalische Variable, nachdem zu den drei Empfindungsqualitäten nachdrücklich festgestellt worden war: "Andere Unterschiede der Qualität des Lichteindruckes existieren nicht." Der Übergang ist etwas anders als bei GRASSMANN, weil nicht einfach physikalische Maßbegriffe zugeordnet werden, sondern der Farbeneindruck gewissermaßen nachgeahmt wird:

> "Der Farbeneindruck, den eine gewisse Quantität x beliebig gemischten Lichts macht, kann stets auch hervorgebracht werden durch Mischung einer gewissen Quantität a weißen Lichtes und einer gewissen Quantität b einer gesättigten Farbe (Spektralfarbe

oder Purpur) von bestimmtem Farbentone."
(HELMHOLTZ 1911, S. 110)

Aus diesem Vorgang leiten sich natürlich die noch heute gebräuchlichen Helmholtz-Koordinaten ab. HELMHOLTZ stellt nachdrücklich fest, daß es mit dieser Darstellung gelingt, die unendlich große Menge verschiedenartiger Farbeindrücke wenigstens auf einfach zu handhabende Begriffe zu reduzieren.

Sofort anschließend wird dieser Gewinn genutzt, indem die Empfindungsmerkmale als "Prinzip, wonach wir die Farben in eine systematische Ordnung bringen können", auf den NEWTONschen Farbenkreis bezogen werden. Dann wird erwähnt, daß NEWTON an einer solchen Anordnung der Farben das Farbenmischungsgesetzt ausgedrückt habe und es wird hinzugefügt: "GRASSMANN hat die Prinzipien, welche in diesem NEWTONschen Verfahren verborgen liegen, entwickelt und ausgesprochen." HELMHOLTZ' Fassung der Grassmannschen Gesetze sei hier im Wortlaut wiedergegeben, um zu zeigen, daß er sich zwar anderer Ausdrücke als GRASSMANN bedient, aber diese Sätze noch genau in dem gleichen Sinne wie GRASSMANN auffaßt.

"Außer dem schon erwähnten Satze, daß:

1. Jede beliebig zusammengesetzte Mischfarbe gleich aussehen müsse, wie die Mischung einer bestimmten gesättigten Farbe mit Weiß, sind dazu noch folgende Sätze notwendig:
2. Wenn von zwei zu vermischenden Lichtern das eine sich stetig ändert, ändert sich auch das Aussehen der Mischung stetig.
3. Gleich aussehende Farben gemischt geben gleich aussehende Mischungen.

Wenn wir diese drei Grundsätze annehmen, läßt sich eine Anordnung der Farben in einer Ebene herstellen, welche erlaubt, die Mischfarbe durch eine Schwerpunktskonstruktion zu finden."
(HELMHOLTZ 1911, S. 112)

Unmittelbar anschließend geht HELMHOLTZ zur Konstruktion einer "geometrischen Farbtafel" in Dreiecksform über, wobei er letztere keiner weiteren Begründung für wert zu halten scheint. Es werden dann die einzelnen geometrischen Schritte,

insbesondere soweit sie sich auf die Anordnung von nicht aus den Ausgangsfarben mischbaren Farben beziehen, expliziert. Dann folgt ein geometrischer Beweis für die Richtigkeit dieser Konstruktion.

Nachdem einige Implikationen solcher Farbentafeln besprochen sind, gibt HELMHOLTZ eine Zusammenfassung aller eben beschriebenen einzelnen Schritte:

> "Wir haben gesehen, daß alle Verschiedenartigkeit des Lichteindrucks als die Funktion dreier unabhängig veränderlichen Größen betrachtet werden kann, und haben bisher als diese drei Veränderlichen 1. die Lichtstärke, 2. den Farbenton und 3. die Sättigung gewählt oder 1. die Quantität Weiß, 2. die Quantität und 3. die Wellenlänge einer Spektralfarbe. Statt dieser drei Variablen kann man aber auch andere drei einführen, und dies ist geschehen, indem man versucht hat, alle Farben als Mischungen von veränderlichen Quantitäten dreier Farben, der sogenannten drei G r u n d f a r b e n zu betrachten, zu welchen man meistens R o t, G e l b in B l a u wählte." (HELMHOLTZ, 1911, S. 118)

Es sind hier drei mal drei Variable einfach zusammengestellt. Der Zusammenhang der ersten beiden Tripel war schon vorher von HELMHOLTZ dargelegt. Er besteht in einer eindeutigen psychophysischen Zuordnung. Das zweite Tripel, die drei Grundfarben, werden etwas unvermittelt angehängt. Es werden hier sogar die alten Malerfarben angefügt, HELMHOLTZ beeilt sich aber dann hinzuzufügen:" Diese drei Farben konnten nur so lange gewählt werden, als man, auf die Mischung der Pigmentfarben vertrauend, fälschlich meinte, gelbes und blaues Licht gemischt gäbe Grün." Auf der nächsten Seite folgt dann der Übergang zur Hypothese von YOUNG, der weiter oben zitiert worden war.

Man sieht, wie HELMHOLTZ teilweise den gleichen Weg geht wie GRASSMANN, teilweise sich ausdrücklich auf ihn beruft. Unabhängig von GRASSMANN und zusätzlich führt er als weitere Variable die drei Grundfarben ein. Sie folgen weder aus der Dreiheit der Empfindungsvariablen noch aus der daher abge-

leiteten der Reizvariablen. Ihre Begründung erfolgt eigenständig als hypothetischer physiologischer Satz, der logisch völlig unabhängig von den anderen ist. Tatsächlich ist aber diesen Sätzen von HELMHOLTZ folgend auf eine Ableitung geschlossen worden, die im nächsten Unterabschnitt dargestellt werden soll.

Auf dieser physiologischen Hypothese fußend, ist für HELMHOLTZ die Dreiecksform der Farbtafel sowie ihre ganze geometrische Struktur eine Folge der physiologischen Voraussetzungen. In diesem Sinne hält er die Kreisform der Farbtafel bei NEWTON und GRASSMANN für "unerwiesen und bezweifelbar". GRASSMANN hatte vorher nämlich festgestellt:

> "Doch bedarf die Art, wie NEWTON die homogenen Farben auf dem Umfang seines Kreises verteilt, einer durchgängigen Revision, zu welcher durch die Versuche des Hrn. HELMHOLTZ nur erst die ersten Anfänge gemacht sind. Erst wenn hierüber ein hinreichendes Licht verbreitet ist, kann man sich an die Beantwortung der interessanten Fragen heranwagen, nach welchem Gesetze die den verschiedenen Farben zugehörigen Aetherschwingungen sich in den Nerven oder im Sensorium zu einfachen Farbeneindrücken zusammensetzen, ..."
> (GRASSMANN 1853, S. 84)

GRASSMANN erwähnt keinen physiologischen Satz. Aus seiner ganzen Abhandlung und dem letzten Zitat geht hervor, daß ihm physiologische Hypothesen, die sich aus dem Dreifarbensatz herleiten, besonders fremd gewesen sein müssen.

b) Moderne Fassungen der Grassmannschen Gesetze und der Dreifarbensatz

In fast allen Darstellungen der Farbenmetrik wird der Dreifarbensatz als wesentlicher Bestandteil der Grassmannschen Gesetze Dargestellt. Als ein Beispiel hierfür sei das ausgezeichnete Buch von P.J. BOUMA (1951) herangezogen. Der Autor nimmt nämlich den gleichen Weg, den GRASSMANN und HELMHOLTZ gegangen waren, indem er von der Dreiheit der Empfindungsmerkmale ausgeht. Der Abschnitt, der hiervon handelt,

wird "Die fundamentale Zahl Drei im Farbenproblem" genannt. BOUMA kommt zu dem gleichen Ergebnis wie auch HELMHOLTZ. Er weist darauf hin, daß man die sehr große Menge von Spektralverteilungen durch die einfachen Begriffe "Farbton", "Sättigung" und "Helligkeit" hinsichtlich der Empfindung erschöpfend beschreiben könne.

Der folgende Abschnitt heißt "Experimentelle Bestätigung der Rolle der Zahl Drei". Das Ergebnis dieser Ausführungen wird als "Grundgesetz der Farbentheorie" bezeichnet:

> "Dieses experimentelle Ergebnis, welches eines der Grundgesetze der Farbentheorie bildet, läßt sich folgendermaßen formulieren:
>
> > Werden drei geeignete Lichtarten in einem bestimmten Verhältnis gemischt, so kann damit jede beliebige Farbempfindung nachgebildet werden.
>
> Das ist in exakter Form die Bestätigung unserer bereits oben dargelegten Ansicht, daß "die Gesamtheit der Farbempfindungen durch Variierung von nur drei Größen restlos zu erfassen ist." (BOUMA 1951,S.19)

Die Dreikomponentenmischung wird ohne ein Wort der Begründung hier als Folge der drei Empfindungsmerkmale dargestellt. Über einen möglichen sachlichen oder logischen Zusammenhang scheint sich jede Begründung zu erübrigen. Der Autor unterstellt auch keine physiologische Stützung dieser Folgebeziehung; denn in dem Abschnitt "Die physilogische Bedeutung der gefundenen Zahl Drei" wird den Physiologen die entsprechende Frage vorgelegt, aber: "Die Antwort auf diese Frage stellt eine Enttäuschung dar..." (S. 27) oder: "Hinsichtlich der Frage, 'wie' diese Empfindungen zustandekommen,tasten wir größtenteils noch im Dunkeln" (S.28).

Später, bei einer Darstellung der Grassmannschen Gesetze, wird das wiedergegebene "Grundgesetz der Farbenmischung" auf GRASSMANN zurückgeführt:

> "Der Inhalt dieses Gesetzes ist zum ersten Mal von GRASSMANN klar formuliert worden und wir werden es daher als das e r s t e G r a s s m a n n s c h e G e s e t z bezeichnen. Wir

> fassen es noch einmal in seiner allgemeinen Form zusammen:
>
> Wenn man drei geeignete relative spektrale Verteilungen (drei Lichtarten) wählt, dann kann man jeden Farbreiz durch additive Mischung dieser drei "Eichreize" (wohl auch p r i m ä r e Farbreize oder Grundfarben genannt) vollkommen nachahmen. Das gewünschte Resultat ist stets durch nur e i n bestimmtes Verhältnis der Anteile dieser Eichreize zu erreichen."
> (BOUMA, 1951, S. 66)

Diese Feststellungen sind richtig und sinnvoll. Man kann sich aber fragen, warum BOUMA u.a. sich überhaupt auf GRASSMANN berufen und solche Sätze nicht einfach als empirische Voraussetzungen formuliert hat.

Das theoretische Problem tritt nämlich erst auf, wenn man sich auf den wirklichen Grassmannschen Satz über die drei an einer Farbe unterscheidbaren Momente beruft und daraus den Dreifarbensatz folgen läßt. Einmal ist die Folgebeziehung schwer zu konstruieren, vor allem aber hat der erste Grassmannsche Satz als Axiom die ganz andere Funktion, die Anordnung von Farben nach der Art des Newtonschen Farbenkreises oder einer beliebigen anderen geschlossenen Kurve mit einem Mittelpunkt als Weiß und einer polaren Anordnung von Gegenfarben zu rechtfertigen.

Man darf auch nicht vergessen, daß es sich für GRASSMANN um die Begründung einer vorausgesetzten Farbordnung handelte und nicht um eine solche, die im Gefolge von Farbenmischungen entstanden ist. Mit Hilfe geometrischer Sätze könnte man sich tatsächlich eine Ableitung des Dreifarbensatzes aus einer Farbordnung, wie sie der Newtonsche Farbenkreis darstellt, denken. Geht man etwa von der Schwerpunktkonstruktion aus, so ließen sich Überlegungen anstellen, nach denen eine Ebene sich nur von drei Punkten, in diesem Falle also drei Farben, geometrisch beherrschen ließe.

In diesem Sinne wäre der Dreifarbensatz nicht aus einer physiologischen Annahme, wie bei MAXWELL und HELMHOLTZ, hergeleitet, sondern aus der Struktur der Farbordnung selbst. Will man

sehen, ob dies zu theoretischen Folgerungen zwingt, muß wieder zwischen empirisch durch Mischungen hergestellten Anordnungen und solchen, die sich auch für die Empfindung als sinnvoll erweisen, unterschieden werden.

Geht man strikte vom ersten Fall aus, brauchen überhaupt keine theoretisch relevanten Sätze zu folgen, wenn das Ergebnis nur als Konsequenz der Voraussetzung des Dreifarbensatzes hingenommen wird. Im zweiten Fall mag die phänomenale Farbordnung vorausgesetzt sein, wie dies für NEWTON zutraf, oder aber sie ist zwar durch Mischung empirisch hergestellt, aber man behauptet, daß sie im Ergebnis eine sinnvolle Phänomenordnung darstelle. Geht man von einer solchen aus, ist jede Folgerung auf einen Dreifarbensatz ein theoretischer Satz, der sich auf ein psychologisches Ordnungsprinzip gründet.

Wahrscheinlich wäre dies nicht im Sinne von BOUMA gewesen, aber es ist, soweit ich sehe, eine Konsequenz solcher von ihm und Anderen aufgestellten Folgebeziehungen zwischen GRASSMANNs erstem Gesetz über die an einer Farbe vorzufindenden Empfindungsmerkmale und dem Dreifarbensatz. Diese Schwierigkeit braucht aber nicht aufzutreten, wenn man sich nicht auf GRASSMANN beruft. Ewald HERING (1887) hat beispielsweise eine von GRASSMANNs Voraussetzungen völlig unabhängige Ableitung von NEWTONs Gesetz der Farbenmischungen gegeben.

HERING hat vor allem an den psychologischen Sätzen von HELMHOLTZ Anstoß genommen. Er wirft ihm sowie GRASSMANN eine fortwährende und unstatthafte Bezugnahme auf das "Tableau der Empfindungen" bei der Ableitung und Darstellung der Farbenmischgesetze vor. HERING plädiert stattdessen für eine rein empirische und theoriefreie Auffassung der Farbenmischgesetze. Der Sinn seiner ganzen umfangreichen Abhandlung "Über NEWTONs Gesetz der Farbenmischung" ist, seine Richtigkeit aufzuweisen, ohne es gleichzeitig im Sinne bestimmter Hypothesen zu interpretieren.

Hierzu wird zunächst festgestellt, welcher Art die geometri-

sche Ordnung der Farben sein müsse, wenn man auf sie die Schwerpunktkonstruktion anwenden könne. Diese geometrischen Überlegungen erstrecken sich systematisch von dem Begriff der "Mischlinien" für "zweiwertige Gemische" über die "Mischebene" für "dreiwertige" bis zum "Mischraum" für "mehrwertige Gemische". An diesen Abschnitt über die geometrische Darstellung von Gemischsystemen schließt sich ein weiterer über "Richtungen und Kräfte als Gemische betrachtet" an.

An die Farben selbst stellt HERING den Anspruch, daß sie sich als Teile von Gemischen qualitativ und quantitativ in ihrem Reizwert nicht ändern und daß dieser auch bezüglich beliebiger Verstimmungen der Netzhaut unverändert erhalten bliebe. Ferner sollte sich aus je vier Lichtern immer eine Farbgleichung herstellen lassen.

HERINGs Argumentation zur Konstanz der Reizwerte hinsichtlich der Netzhautstimmung und dem Vorkommen eines Lichtes in beliebigen Gemischen läuft dem Sinne nach auf das Gleiche hinaus wie das dritte Grassmannsche Gesetz. Formal gesehen geht HERING anders vor, indem er z.B. anhand von Farbengleichungen zeigt, daß "Gleiches zu Gleichem hinzuaddiert, Gleiches ergibt". Er zeigt aber die Richtigkeit seiner Voraussetzungen experimentell an eigens dazu entworfenen Versuchen.

Zur Aufstellung eines Gemischsystems bedient HERING sich, von technischen Details abgesehen, der gleichen Operationen wie MAXWELL und HELMHOLTZ: Man geht von drei Farben aus, findet durch Mischung die übrigen und trägt die Ergebnisse in eine Farbtafel ein, nachdem man Ort und Maßeinheit der Ausgangsfarben festgelegt hat.

HERING kommt der Sache nach nicht zu abweichenden Ergebnissen. Auch hält er die Grassmannschen Gesetze, einzeln genommen, für richtig, stellt jedoch am Schluß seiner Untersuchung zu GRASSMANNs Abhandlung polemisierend fest: "Aber der ganze Beweis für die Richtigkeit des Newtonschen Gesetzes ist unbewußt erschlichen, weil die Voraussetzungen größtenteils

falsch sind." Dabei beziehen sich HERINGs Einwände gegen GRASSMANN und HELMHOLTZ so gut wie vollständig auf alle Schlüsse, die von der Anordnung der Farben als "Empfindungstableau" ausgehen. Dies sind in seinem Sinne "falsche Voraussetzungen".

Es ist leicht zu sehen, daß diese Ausführungen von HERING dem Sinne nach viel besser zu unseren heutigen Bestrebungen nach einer theoriefreien Farbenmetrik passen würden.

Zusammenfassung

NEWTON hat seine Schwerpunktkonstruktion als Anordnungsprinzip von Farborten, wie sie sich aus Mischungen ergeben, anhand eines vorausgesetzten Farbenkreises eingeführt. Dieser war ohne physikalische Messungen und ohne sonstige physikalische Grundlagen nach Merkmalen aufgebaut, die Farben als Phänomene besitzen.

GRASSMANN übernimmt diese Ordnung von NEWTON und spricht Sätze aus, die sie im Sinne von Axiomen begründen sollen. Insofern sie sich auf die Farbordnung beziehen, sind sie naturgemäß phänomenale Sätze. Aber auch das regelhafte Verhalten von Farben in Mischungen wird nicht von physikalischen Maßen oder Grundsätzen her begründet, sondern aus nur der Anschauung zugänglichen und auf die Anschauung bezogenen Tatbeständen. Die geometrische Explikation zeigt, daß die Zuordnung von Vektoren zu Farben möglich ist, weil die Farbwahrnehmung unabhängig von der speziellen Zusammensetzung einer Farbe aus verschiedenen homogenen Lichtern eine zuverlässige Bestimmung des Farbortes erlaubt. Das Verhalten der phänomenalen Farben erfüllt somit das Assoziativgesetz hinsichtlich der Vektorkomponenten, wonach sich Farbmischungen als Vektoradditionen darstellen lassen. Die Grassmannschen Gesetze sind nach Form und Inhalt mit den heute üblichen psychometrischen Fragestellungen identisch, die im Hinblick auf die metrischen Eigenschaften einer beliebigen Mannigfaltigkeit von phänomenalen Gegebenheiten erhoben werden.

Die Grassmannschen Gesetze enthalten keinen Hinweis auf Dreifarbensätze. Historisch haben sich diese aus der Annahme von Thomas YOUNG entwickelt und sind somit aus physiologischen Annahmen über die Zahl von Grundempfindungen oder Farbrezeptoren entstanden. Werden sie aus der im ersten Grassmannschen Gesetz ausgesprochenen Dreiheit von Farbton, Sättigung und Helligkeit abgeleitet, so beziehen sie sich auf Eigentümlichkeiten der Empfindung und beruhen auf psychologischen Sätzen.

HERING hat besonders HELMHOLTZ und GRASSMANN wegen des Gebrauchs solcher psychologischer Sätze kritisiert und schlug eine Begründung der Gesetze der Farbenmischung vor, die sich allein auf das Verhalten der objektiven Farben in Mischungen beziehen soll.

Von der modernen Farbenmetrik dürfte der Dreikomponentensatz nicht aus den Grassmannschen Gesetzen hergeleitet werden.

Von einer theoretischen Begründung der Farbenmischungen oder des Dreifarbensatzes durch NEWTON und GRASSMANN kann keine Rede sein, denn nirgends wird ein Modell oder eine Theorie physikalischer oder psychologischer Natur zugrundegelegt.

III. Die Farbenmischungen in einzelnen Sachgebieten

Die Grassmannschen Gesetze waren vorher als psychometrische Axiome bezeichnet, und es war behauptet worden, daß jede Begründung der Farbenmischungen von dort her sich aus psychologischen Sätzen ableiten müßte. Damit ist nicht behauptet, daß die Grassmannschen Gesetze die einzig mögliche Begründung der Farbenmischungen seien. Es wäre denkbar, daß diese Sätze durch eine rein formale Koinzidenz mit den Farbenmischungen verbunden wäre. Es genügte vollkommen, daß man z.B. die Vektoraddition mit Erfolg anwenden könnte, damit eine solche formale Koinzidenz gegeben sei. Es bleibt also völlig offen, wie die Farbenmischungen von bestimmten Sachverhalten ausgehend anders begründet werden können.

Von den verschiedenen Disziplinen, deren Gegenstand Farbenmischungen sind, bezieht sich keine ausdrücklich auf psychologische Begründungen. Dies gilt auch von der Psychologie selbst; denn es gibt keine psychologische Theorie der Farbenmischung. Nun stehen zwei Möglichkeiten offen, indem man entweder die Farbenmischung als empirischen Sachverhalt hinnimmt oder andere Daten findet, die eine Begründung erlauben.

Untersucht man die verschiedenen Sachgebiete unter diesem Kriterium, so findet man teilweise Scheinbegründungen von der Art, daß man sich etwa auf die Grassmannschen Gesetze beruft und gleichzeitig behauptet, man bediene sich im wesentlichen physikalischer Sätze. Dies gilt sowohl hinsichtlich der Farbenmischungen überhaupt als auch für den Dreifarbensatz im besonderen. In anderen Fällen werden wirklich sachliche Annahmen anderer Art gemacht, die mit der Empirie der Farbenmischungen in Verbindung gebracht werden.

Im Folgenden wird versucht, von den einzelnen Sachgebieten eine solche Darstellung zu geben, die gerade diesen Fragen gerecht wird. Es ist ziemlich willkürlich, wie hier in Sach-

gebiete eingeteilt worden ist. Systematisch gesehen ist der Zusammenhang verschiedener Disziplinen in bezug auf einen bestimmten Gegenstand ein äußerst schwieriges Problem. Man kann mit Recht fragen, ob ein Gegenstand von den Methoden überhaupt trennbar ist, ob der Gegenstand "Farbe" z.B. in irgendeinem Sinn mit sich selbst identisch bleibt, wenn er in der Physik zum einen und in der Psychologie zum anderen behandelt wird.

Es gibt einen entgegengesetzten, extrem unsystematischen Standpunkt, der sich an die historisch gewachsenen Gebiete hält. Hiernach ist Physik was der Physiker tut und für die anderen Sachgebiete entsprechend. Dieser Standpunkt ist in vielen Fällen vielleicht fruchtbar, in der Farbenlehre sicherlich nicht.

Es hat viel Verwirrung gestiftet, dasjenige als Physik zu bezeichnen, was tatsächlich von Physikern geleistet worden ist. Die Sachgebiete jedoch in ihrem systematischen Zusammenhang darzustellen, setzt schon eine Farbentheorie, die über die einzelnen Disziplinen hinausgeht, voraus. Die hier vorgenommene Einteilung ist ein Konglomerat verschiedener Gesichtspunkte, wie man etwa der Überschrift des einen Abschnittes "Physiologie und Theorie des Farbensehens" entnehmen kann.

1. Physik

Über die Stellung der Farbenmischungen zur Physik ist an verschiedenen Orten dieser Arbeit bereits Stellung bezogen worden. Im wesentlichen wird das gleiche hier unter anderem Gesichtspunkt wiederholt. Der Gegenstand der Farbenlehre ist in der Physik ein Teilgebiet der Optik. Physikalisch ist "Licht" entweder ein Vorgang, der nach dem Modell der Welle oder aber als Quantum gefaßt wird. Für Aussagen, die in diesen Zusammenhängen von "Farbe" handeln, ist dies nur ein Name, der nichts mit der gleichnamigen anschaulichen Gegebenheit zu tun hat.

Anders verhält es sich mit den Farbenmischungen. Wenn man sie

als ein Teilgebiet der Physik bezeichnet, so stellen sie das einzige dar, das nicht unabhängig von einem Beobachter denkbar ist. Dies gilt nicht nur in dem allgemeinen Sinn, daß immer ein Beobachter da sein muß, der im minimalsten Fall die "Zeigerablesung" tätigt, sondern der Beobachter selbst muß von einer bestimmten Art sein.

Wenn ein Strahlengemisch von 540 nm und 610 nm, also grün und rot aussehendes Licht, und eine Strahlung von 570 nm, gelb aussehendes Licht, für einen nicht farbenblinden menschlichen Beobachter gleich aussehen, so liegt dies allein in der Eigentümlichkeit seiner Farbwahrnehmung begründet. Es gibt kein physikalisches Modell, nach dem dieser Vorgang erklärbar wäre. Strahlungen als physikalische Ereignisse können keine Wirkungen aufeinander ausüben. Aus der Wellenlehre lassen sich z.B. Vorgänge wie Interferenz und Polarisation ableiten, aber keine solchen, nach denen verschiedene Strahlungen im Zusammenwirken eine neue Strahlung von bestimmter Wellenlänge hervorbringen könnten.

Selbst wenn man sich in einer zugespitzten Argumentation darauf festlegt, daß die Physik als Ganzes nur Sinn hat im Bezug auf die Existenz von menschlichen Subjekten, so bestehen mindestens graduelle Unterschiede. Von der physikalischen Wärmelehre wird man nicht in dem gleichen Sinn behaupten können, daß sie von dem menschlichen Temperatursinn abhinge, wie man von den Gesetzen der Farbenmischung sagen muß, daß sie ohne eine Farbwahrnehmung sinnlos wären.

2. Photometrie

In einem gewissen Sinn ist die Photometrie dasjenige Sachgebiet, welches der Physik am nächsten stehen sollte. Insofern die Photometrie nur Licht messen will, könnte man annehmen, daß sie von der Farbenmessung und den Farbenmischungen unabhängig sei. Dies würde gelten, wenn es nur um die Messung von Strahlungsenergien ginge. Dann wäre das Problem rein physikalisch und in diesem Fall einfach. Licht ist aber

nicht bloß Energie, sondern ein Sinneseindruck. Das bedeutet zunächst, daß wir die Empfindung, die von einer Strahlung ausgelöst wird, zur Energie in Beziehung setzen müssen.

Die erste Schwierigkeit besteht darin, daß man die Energie von Strahlungen nicht allgemein und unabhängig von ihrer Wellenlänge mit der Lichtempfindung in Beziehung bringen kann, sondern daß Strahlungen von verschiedenen Wellenlängen bei gleicher Energie unterschiedlich stark auf das Auge wirken. Wollen wir also einen allgemeinen Begriff "Helligkeit" für verschiedene Lichter einführen, müssen wir die unterschiedlichen Wirkungen von Strahlungen verschiedener Wellenlänge in die Definition des Helligkeitsbegriffes eingehen lassen.

Nun ist es leicht, zwei Lichtflecke gleicher Strahlungsart in bezug auf ihre Helligkeit miteinander zu vergleichen. Soweit nur dieses angestrebt wird, spricht man von "isochromer Photometrie". Es zeigt sich aber, daß ein menschlicher Beobachter zwei Lichtflecke von identischer Farbe dann als gleich beurteilt, wenn sie auch physikalisch von gleicher Energie sind. Sind die Lichtflecke von verschiedener Farbe, so erscheinen sie unter Umständen bei gleicher physikalischer Energie nicht gleich hell. Umgekehrt wenn der Beobachter zwei verschiedene Farben als gleich hell beurteilt, können die physikalischen Energien dieser Strahlungen ungleich sein. Dieses Problem ließe sich lösen, indem man die physikalischen Energien unterschiedlich bewertet. Man kann zwei Strahlungen verschiedener Wellenlänge, die dem Beobachter gleich hell erscheinen, durch einen Faktor einander gleich machen.

Aber auch damit sind die Schwierigkeiten nicht erschöpft. Die meisten Lichter wie etwa das einer Glühbirne setzen sich aus Strahlungen sehr verschiedener Wellenlängen zusammen. Hat man diese nach ihrem Helligkeitseindruck je verschieden bewertet und kennt man die Energie jeder einzelnen Strahlung, so kann man durch Zusammenzählen all dieser Werte zu einem Ausdruck für die Gesamthelligkeit eines Lichtes kommen. Diese errechnete Helligkeit stimmt aber nicht ohne weiteres mit der erlebten Helligkeit überein. Es sollte damit gezeigt werden,

daß Helligkeiten nicht in einfacher Weise summierbar sind.

Eine angenäherte Lösung läßt sich finden, wenn man die Bewertungen der Energie nicht auf den Vergleich sehr verschiedenfarbiger Lichter aufbaut, sondern nur solche miteinander vergleicht, die sich in der Farbe fast nicht unterschieden. Dann zeigt sich, daß die verschieden bewerteten Energien sinnvoll zu einer Gesamthelligkeit addiert werden können. Dieses Verfahren nennt man "Kleinstufenvergleich". Es scheint für eine solche Methode wesentlich zu sein, daß die Unterschiede in der Farbqualität möglichst nicht ins Spiel kommen.

Additivität der Helligkeit ist nämlich auch dann gegeben, wenn man sich eines rein funktionalen Merkmales farbiger Lichter bedient, bei dem die Qualität der zu vergleichenden Farben überhaupt nicht in den Vergleich eingeht. Wenn man Lichter in rascher Folge aufleuchten und erlöschen läßt, so gibt es eine Grenze in der Frequenz dieser Abfolgen, jenseits der das Flimmern in einen stetigen Lichteindruck übergeht. Aus diesem Verhalten verschiedenfarbiger Lichter lassen sich Kriterien ableiten, die zu einem Helligkeitsvergleich führen, der von den Farben der Lichter unabhängig ist. Eine Bewertung der Strahlungsenergie, die auf solche Verfahren gegründet ist, führt ebenfalls zu einer Additivität der Helligkeiten.

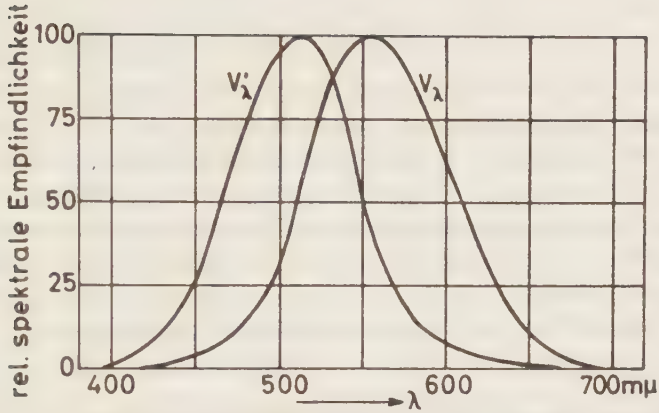
Wenn man annimmt, daß die Beschränkung auf eine einfache Dimension vereinfachend wirkt, so zeigen die Erfahrungen bei der Photometrie verschiedenfarbiger Lichter das Gegenteil. Farbton, Helligkeit und Sättigung sind in einer Farbe so miteinander verbunden, daß dem Auge eine Aufspaltung offenbar nicht gelingt. Wahrscheinlich ist es ein Fehlschluß, aus der Unterscheidbarkeit dieser drei Eigenschaften ihre Unabhängigkeit und Trennbarkeit zu folgern. HERINGs Kritik an GRASSMANN und HELMHOLTZ bezog sich gerade auf die Zuordnung von physikalisch unabhängigen Variablen zu den drei Dimensionen des Sinneseindruckes.

So hat auch der Physiker Ernst SCHRÖDINGER (1920) überhaupt bestritten, daß sich eine Photometrie auf diese Weise auf-

bauen ließe. Er vertritt den Standpunkt, daß der Beobachter immer nur auf Ähnlichkeit der zu vergleichenden Lichtarten gerichtet sei und daß man nicht entscheiden könne, welches Moment die Beurteilung tatsächlich hervorbringe. In Konsequenz seiner Ansicht konnte SCHRÖDINGER jedoch zeigen, daß die Kolorimetrie unabhängig von Helligkeitsvergleichen durchführbar ist. Hier werden Farben nämlich nur auf Gleichheit nach ihrem Gesamteindruck beurteilt, was der Beobachter mit großer Zuverlässigkeit leistet.

Die Ergebnisse, zu denen man in der Praxis mit den angegebenen Methoden kommt, sind zwar verwertbar, führen aber doch an entscheidenden Stellen zu Widersprüchen zwischen verschiedenen Meßergebnissen. Theoretisch ist die ganze Prozedur höchst anfechtbar und wird zu einer Angelegenheit von Standpunkten, indem man entweder auf verbesserbare Schwächen der einzelnen Verfahren hinweist oder aber eine prinzipielle Möglichkeit bestreitet, einfache Variable wie Energie und Helligkeit und Farbton und Wellenlänge voneinander unabhängig zu behandeln. Auf jeden Fall sind Kurven hergestellt worden, die als "spektrale Hellempfindlichkeit des Auges" allen Lichtmessungen zugrunde gelegt werden.

Man unterscheidet zwei solcher Kurven je nach dem Adaptationszustand des Auges, in dem die Messungen vorgenommen worden sind. Die eine Kurve bezieht sich auf das helladaptierte Auge (V_λ), die andere auf das dunkeladaptierte Auge (V'_λ) (Abb.8). Dieser Unterscheidung liegt die Erfahrung zugrunde, daß die Helligkeitsbeziehungen von Farben untereinander in der Dämmerung anders sind als im hellen Tageslicht. Blau wirkt etwa bei Tage verhältnismäßig dunkler und in der Dämmerung heller als andere Farben (Purkinjesches Phänomen). Zwischen den Extremfällen, die durch diese beiden Kurven beschrieben werden, liegen alle Übergänge für verschiedene Helligkeiten. Mit dem Unterschied vom Tagessehen zum Dämmerungssehen verbindet man den Übergang von einem Rezeptorsystem (Zäpfchen) zu einem anderen (Stäbchen). Für die Photometrie sind solche physiologischen Interpretationen überflüssig, denn man kann sie sich



Relative spektrale Hellempfindlichkeitskurve V_λ (IBK.-Werte) (Tageswert- und relative spektrale Dämmerwert-Kurve V'_λ (letztere nach *Bender*).

Abb. 8 (RICHTER 1940)

Abszisse stellt die Wellenlängen dar.

Ordinate gibt die jeweils auf das Maximum jeder Kurve bezogenen reziproken Werte der Strahlungsleistungen wieder, die nötig sind, um einen gleichen Helligkeitseindruck zu erzeugen.

Die Kurve V ergibt sich bei Messungen am helladaptierten, die Kurve V' am dunkeladaptierten Augen.

Die Werte V sind von der Internationalen Beleuchtungskommission (IBK) normiert.

weder praktisch noch theoretisch nutzbar machen.

Das Maximum der Kurve für das Tagessehen liegt bei einem Grün von 555 nm. Per definitionem ist dies die hellste Farbe des Spektrums. Dies entspricht nicht der Phänomenologie der Farben, nach der Gelb die hellste Farbe des Spektrums genannt werden müßte. Diese Feststellung ist kein Einwand bezüglich der meßtechnischen Bewährung dieser Definition, aber sie beinhaltet den Hinweis, daß die phänomenale Helligkeit mit dem beschriebenen Verfahren nicht eingefangen wird. Es braucht nach diesen Ausführungen kaum darauf hingewiesen zu werden, daß die Rolle des Beobachters in der Lichtmessung nicht auf die "Zeigerablesung" beschränkt ist, sondern daß alle Probleme im Grunde auf ungeklärte phänomenale Eigenschaften des Lichtes zurückgehen.

Die Farbenmischung ist außerdem zumindest teilweise in der Photometrie enthalten; denn jedes Licht, das aus Strahlungen verschiedener Wellenlängen zusammengesetzt ist, ist auch ein Gemisch. Nur bezieht sich die Messung in dem einen Falle auf die einzelne Dimension der Helligkeit und im anderen Falle auf die besondere Qualität der Farbe. Andererseits ist die Farbmischung insoweit Photometrie, als sie nicht nur die Farbqualität als Mengenverhältnis der Ausgangslichter festhalten will, sondern diese Mengen als Helligkeiten ausgedrückt photometrisch zu fassen versucht. Die Frage nach der Additivität der Helligkeiten stellt für beide Disziplinen das gleiche Problem.

3. Kolorimetrie

Als eigene Disziplin dient die Kolometrie oder Farbenmetrik vor allem dem praktischen Zweck, Farben zu kennzeichnen. Dies wäre kein Problem, wenn es nur Spektralfarben gäbe, so daß jede durch eine Wellenlänge eindeutig zu bezeichnen wäre. Jedoch sind die meisten Farben unserer Umwelt im Spektrum nicht enthalten. Im Prinzip könnte man sich zu ihrer Kennzeichnung

einer Mustersammlung bedienen. Stattdessen wird aber von den Farbenmischungen Gebrauch gemacht, indem man jede beliebige Farbe durch ein Mengenverhältnis von drei Ausgangsfarben kennzeichnen kann. Dieses Verfahren hat den großen Vorteil, zugleich systematisch und lückenlos zu sein.

Aus diesem Grunde kann die Farbenmetrik heute als die eigentliche Domäne für praktische und theoretische Erörterungen der Probleme des Farbenmisches angesehen werden. Der erste Schritt zu einer farbmetrischen Erfassung des Universums der Farben besteht in praktischen Mischungen. Da man auch mit günstig gewählten Ausgangsfarben nur einen beschränkten Teil der übrigen durch Mischung herstellen kann, macht man von dem Prinzip der indirekten Farbenmischung Gebrauch. Dieses erlaubt, einer Farbe wenigstens geometrisch ihren Ort auf einer Farbentafel zuzuweisen. Eine Farbentafel wird auch heute noch nach denselben geometrischen Grundsätzen hergestellt, wie sie bereits MAXWELL vorgeschrieben hatte.

Einer Farbtafel lassen sich nur die Mengenverhältnisse der Ausgangsfarben entnehmen, durch die eine bestimmte Farbe gekennzeichnet ist. Um aber auch die absoluten Beträge der einzelnen Farben darstellen zu können, bedient man sich eines dreidimensionalen Farbraumes. Hierzu werden von einem Ursprungspunkt drei Vektoren abgetragen. Jede Farbtafel läßt sich dann als die parametrische Darstellung einer Ebene in einem dreidimensionalen Vektorgebilde verstehen.

Anschaulich ist jede Farbtafel ein Schnitt durch den Farbraum. Man kann solche Schnitte beliebig legen und auf diese Weise beliebig viele Farbtafeln definieren. Jeder Punkt einer jeden Farbtafel läßt sich durch ein anteiliges Verhältnis der Ausgangsfarben bestimmen (Eichreizanteile). Auf jeder Farbtafel gilt somit die Schwerpunktkonstruktion.

Bezieht man sich auf einen beliebigen Punkt im Farbraum, so läßt sich dieser durch eine Vektoradditionsgleichung aus den Ursprungsvektoren darstellen. In diesem Fall ist eine Farbe auch nach ihrem absoluten Intensitätsbetrag gekennzeichnet

(Lichtreizbetrag). Aus mathematischen Gründen ist jeder Übergang von einem beliebigen Punkt einer Farbtafel zu einem beliebigen Punkt im Farbraum möglich.

Hat man ein Gemischsystem, also einen Farbraum, aufgrund eines bestimmten Tripels von Ausgangsfarben hergestellt, so ist damit nur eine von unzählig vielen Möglichkeiten realisiert. Man hätte genauso gut andere Ausgangsfarben wählen können. Diese hätten einen anderen Farbraum mit einer anderen Anordnung der einzelnen Farben ergeben. Diese Veränderungen des Farbraumes durch andere Ausgangsfarben kann man durch Rechnung ermitteln. Geometrisch gesehen handelt es sich um affine Transformationen des Farbraumes. Für jede einzelne Farbe heißt dies, daß sie aus unendlich vielen Tripeln von anderen Farben darstellbar ist. Die Menge aller gleich aussehenden Gemische nennt man "Farbreizvalenz".

Aus meßtechnischen Gründen hat man bestimmte Ausgangsfarben und einen bestimmten Ausgangswert für die Helligkeiten international normiert. Abb. 9 zeigt die von der Internationalen Beleuchtungskommission (IBK) vereinbarte Farbtafel. Auf dieser läßt sich jeder beliebige Farbton gemäß der Schwerpunktregel als ein bestimmter Ort darstellen. Die auf dieser Farbtafel eingezeichneten Ellipsen beziehen sich auf die Schwellenwerte, also diejenigen Abstände, die einen konstanten subjektiven Unterschied von Farben angeben. Man sieht, daß dieser Unterschied nach verschiedenen Richtungen verschieden groß ist, wie es das Größenverhältnis der Ellipsenachsen zueinander ausdrückt. Auch sind die Ellipsen im ganzen an verschiedenen Stellen der Farbtafel verschieden groß.

Daraus, daß die Farborte nicht subjektiv gleichabständig angeordnet sind, schließt man auf nichtsubjektive Eigenschaften des verwendeten Maßstabes. Es ist viel Mühle darauf verwendet worden, diese Farbtafel so zu transformieren, daß sie auch subjektiv gleichabständige Farborte ergibt. Dies ist bisher nur in grober Annäherung gelungen.

Das System der Farbmetrik kommt lediglich an einer Stelle mit

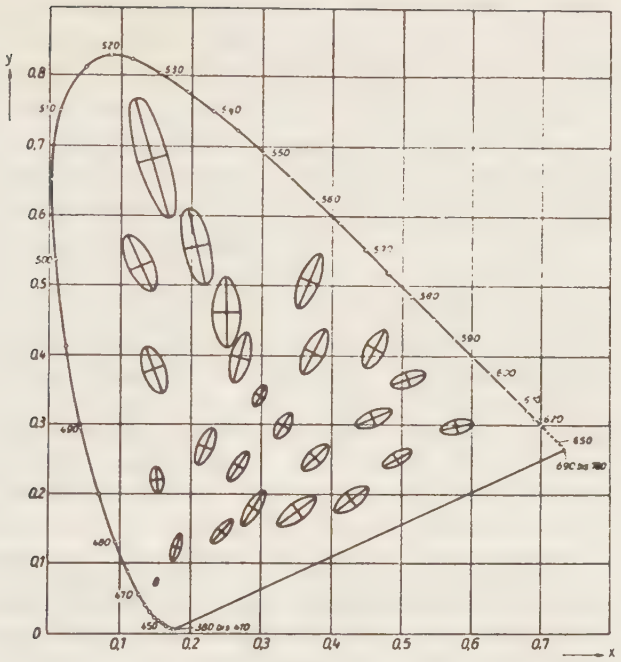


Bild 8

Farbtafel mit Schwellenwertkurven nach McAdam (Ellipsen 10fach vergrößert)

Abb. 9 (ZEISS; "Grundlagen der Farbmessung")

IBK Farbtafel

Abszisse und Ordinate stellen Eichreizanteile des von der Internationalen Beleuchtungskommission normierten XYZ-Systems dar.

Die Punkte auf der Kurve geben den Ort der durch ihre Wellenlängen bezeichneten Spektralfarben wieder.

Die eingezeichneten Ellipsen sind die Ergebnisse von Untersuchungen über ebenmerkliche Empfindungsunterschiede. Die Mittelpunkte der Ellipsen bezeichnen eine bestimmte Farbe, der Abstand zu jedem Punkt der Ellipse einen Schwellenwert in jeder Richtung der Ebene.

seinen eigenen Festlegungen in Widerspruch: wenn im Farben mischapparat zwei Lichtflecke für einen Betrachter in "jeder Hinsicht" gleich aussehen, dann müßten sie auch photometrisch gleich sein. Mißt man aber die Intensitäten (Leuchtdichten), so stellt sich in vielen Fällen heraus, daß sie voneinander abweichen. Das grundlegende "Additivitätstheorem der Helligkeiten" scheint also nicht durchgängig zu gelten. Theoretisch gesehen ist dies eine ganz erhebliche Schwierigkeit, denn der Farbraum ist theoretisch so konzipiert, daß die verschiedenen Rechnungen und Transformationen gerade auf diesem Satz fußen. Andererseits kann kaum bestritten werden, daß diese Operationen zu richtigen Ergebnissen führen.

Zweifel an der Gültigkeit des Theorems hat es schon lange gegeben, jedoch scheinen sie jetzt zu wichtigen Änderungen in den Konzeptionen der Farbenmetrik zu führen. Jedenfalls sagt D.B. JUDD (1955) solche voraus. Als naheliegendste Konsequenz wird eine Veränderung der photometrischen Bewertung der Helligkeiten vorgeschlagen. Damit würde man sich von meßtechnischen Widersprüchen befreien. Ob das Problem auf diese Weise zu beseitigen ist, bleibt dahingestellt.

Man müßte sich vielmehr fragen, ob an dieser Stelle nicht zwei verschiedene Definitionen des Begriffes Helligkeiten miteinander in Widerspruch geraten. Es war gezeigt worden, wie die Photometrie den naiven Helligkeitseindruck durch indirekte Methoden ersetzen mußte, um das Additivitätstheorem erfüllen zu können. In der Kolorimetrie kommt aber gerade der naive Helligkeitseindruck als Kriterium in Frage, da hier ja ganze Farben mit ihrer Helligkeit, ihrer Sättigung und ihrem Farbton verglichen werden. Man wird gegen dieses Argument einwenden, daß der Vergleich sich immer auf gleiche Farben bezieht und insofern photometrisch unproblematisch sei.

Die Schwierigkeit liegt aber bereits in den Voraussetzungen. Es war bisher nicht erwähnt worden, daß der Helligkeitseindruck zum Lichtreiz in angenähert logarithmischer Beziehung steht. So gesehen ist es überhaupt problematisch, wieso ein

auf Additivität beruhendes System von Anordnungen und Transformationen widerspruchslos bestehen kann, wenn visuelle Farbeindrücke das Anordnungskriterium ausmachen. Dieses Problem ist zu verwickelt, um hier diskutiert werden zu können. Wesentlich in diesem Zusammenhang ist nur, daß man sich in der Farbenmetrik aus solchen Schwierigkeiten herauszuhalten meint, indem man auf die "rein physikalische Natur" der verwendeten Maßstäbe verweist.

Man bezieht sich in der Farbenmetrik ausdrücklich auf den Farbreiz und will die Farbempfindungen aus der Betrachtung ausschließen. Da andererseits die Grassmannschen Gesetze als rationale Grundlage des ganzen Verfahrens angesehen werden, dürfen sie sich nicht auf die Farbempfindung beziehen. Ein typisches Beispiel für eine solche Argumentation sei hier zitiert:

> "Was uns sehend bewußt wird, sind freilich Farbempfindungen und keine normierten Farbreize. Da jedoch die Grassmannschen Gesetze nur für diese streng gültig sind, kann man messen, ordnen, normen nur bei Farbreizen, aber nicht bei Farbempfindungen, die zu vielen nicht erfaßbaren Variationsmöglichkeiten unterworfen sind." (M. RICHTER, 1940,S.100)

Die Gegenüberstellung von Farbempfindung und Farbreiz findet eine Parallele in der Gegenüberstellung der Rolle des Beobachters und der Verwendung physikalischer Maßstäbe. Man versucht die Rolle des Beobachters auf das äußerste zu beschränken und daraus herzuleiten, daß bei der Farbmessung nur physikalische Maßstäbe wesentlich sind. Es soll hier nicht bestritten werden, daß eine Unterscheidung von Farbreiz und Farbempfindung im Sinne einer Beschränkung auf das Einfachere fruchtbar sein kann.

Die Farbwahrnehmung stellt in der Tat einen sehr komplexen und unter verschiedenen Bedingungen sehr variablen Gegenstand dar. Der Begriff "Farbreiz" wird beispielsweise von RICHTER (1940) als ein Vorgang unter folgenden Bedingungen definiert:

a) Farbennormalsichtiges Auge
b) ausschließlich foveales Zapfensehen (helladaptiertes Auge)
c) blendungsfreies Sehen
d) Neutralstimmung des Auges
e) freies (reduziertes) Farbensehen.

Ohne diese Punkte im einzelnen zu diskutieren, sei festgestellt, daß es sich um eine Definition von Beobachtungsbedingungen handelt. Durch eine solche Festlegung läßt sich die Empfindung natürlich nicht herausmanövrieren, sondern sie läßt sich nur in ihren Variationsmöglichkeiten beschränken. Es scheint, als ob sich die Farbenmetrik dort, wo sie "Farbempfindung unter bestimmten Beobachtungsbedingungen" meint, auf den Farbreiz beruft.

Durch eine weitere ähnliche Definition versucht man, sich des Beobachters und seiner Farbwahrnehmung zu entledigen. Seine Funktion soll unwesentlich sein, weil bei der Herstellung einer Farbgleichung keine qualitative Aussage von ihm verlangt wird, sondern nur ein Gleichurteil.

Die Rolle der Versuchsperson unterscheidet sich damit nicht von der, die sie in jedem klassischen psychophysischen Experiment einnimmt. Es ist lediglich eine Sache der Methode, ob wir im Experiment Urteile über Gleichheit, Unterschied oder ob wir Kategorienaussagen verlangen.

Nun ist es zweifellos möglich, die Aussagen des Beobachters durch ein physikalisches Maß festzuhalten. Es ist aber nicht korrekt, die Rolle des Beobachters auf das "Anlegen" des nun vorausgesetzten Maßstabes zu beschränken. H. ARENS (1951) stellt fest, daß wir nicht empfindungsgemäß messen, "sondern mit einem nach physikalischen Gesichtspunkten aufgebauten Maßstabe" (S. 24). Er führt außerdem noch aus, daß man sich zum Anlegen von Maßstäben "grundsätzlich der Sinne bedienen muß" (S. 23). Nur dieser Vorgang soll als psychologischer

verstanden werden.

Diese Ansicht wäre vertretbar, wenn wir aus physikalischen Zusammenhängen die Gesamtheit von Reizen, die mit unseren Farbwahrnehmungen kovariieren, unabhängig von einem Beobachter festlegen könnten. Nur dann wäre seine Rolle auf das Anlegen des Maßstabes beschränkbar. Man darf nicht vergessen, daß alle Gemische, die wir als eine Farbreizvalenz auszeichnen, unter sich keine physikalisch sinnvollen Beziehungen aufweisen.

Tatsächlich werden vom Beobachter keine Maßstäbe angelegt, sondern sie werden von ihm nach Maßgabe seiner Wahrnehmungen verknüpft. Dies erfolgt durch ein Gleichurteil. Erstaunlicherweise liefert ein solches System von Verknüpfungen einen metrischen Raum, also einen Raum, der u.a. beliebige lineare Transformationen zuläßt.

Man braucht sich nur zu überlegen, welche physikalischen Maße zur Herstellung eines Gemischsystems nötig sind und welche Bedeutung sie haben, um sich die Rolle des Beobachters zu vergegenwärtigen. Das physikalische Maß der Wellenlänge ist linear und additiv, aber von diesen Eigenschaften machen wir in der Farbmessung keinen Gebrauch. Man benötigt den Begriff der Wellenlänge nur zur Identifikation einer Farbe. Es lassen sich genauso qualitative Kategorien wie "Blau", "Rot" usw. verwenden. Dazu ist nur vorauszusetzen, daß die Urteilsverteilung eines Kollektivs von Beurteilern in bezug auf das Merkmal der Wellenlänge einen eindeutigen Gipfel hat. Diese Voraussetzung ist zweifellos gegeben. Die Genauigkeit der Identifikation ist hierbei kein psychometrisches, sondern nur ein statistisches Problem, welches sich im Sinne der Fehlertheorie behandeln läßt.

Bei einer gegebenen Streuung der Urteilsverteilung einer Kategorie (s) hängt die Genauigkeit nur noch von der Streuung des Mittelwertes (s_m) einer solchen Verteilung ab. Diese läßt sich aber durch Vergrößerung der Beobachterzahl (n) nach der Beziehung $s_m = \frac{s}{\sqrt{n}}$ beliebig verkleinern. Es ist

kein Problem, die Lage solch einer Kategorie mit einer Genauigkeit festzulegen, die weit unter der visuellen Unterscheidbarkeit von Farben liegt. Allerdings würde die Anzahl der Punkte bei sprachlichen Kategorien verhältnismäßig gering sein. Die Logik der Prozedur bleibt davon unberührt.

Danach macht es gerade keinen wesentlichen Unterschied, ob der Beobachter ein Gemisch mit einer Farbe z.B. vergleicht und als gleich beurteilt oder aber ob er ein Gemisch "Blaugrün" nennt, da wir diese Beziehung in der gleichen Weise brauchen können wie die Bezeichnung 490 nm beispielsweise.

Beschränkungen in den Aussagen, die von einem Beobachter verlangt werden, haben keine große methodologische Relevanz. Hinsichtlich einer theoretischen Begründung der Kolorimetrie sind sie überflüssig, schon gar nicht führen sie auf physikalische Zusammenhänge.

Andererseits folgt aus diesen Überlegungen nicht, daß die Kolorimetrie physikalisch prinzipiell nicht begründet sei. Es mag durchaus Möglichkeiten geben, von denen wir noch keinen Gebrauch gemacht haben oder die wir noch gar nicht kennen. Ebenso ließe sich auch dann, wenn wir mit phänomenalen Maßstäben messen würden, nicht angeben, wieso der Beobachter kraft seiner Wahrnehmung seine Urteile so vornimmt, daß Farbräume von der beschriebenen Art entstehen; denn die Verwendung von phänomenalen Maßstäben ist genauso wenig schon eine psychologische Begründung wie die Verwendung von physikalischen Maßstäben eine physikalische Begründung mit sich führt.

4. Physiologie und Theorien des Farbensehens

Es ist eine bemerkenswerte Situation, daß wir zwar Rezeptoren für Lichtreize kennen, aber kein gesichertes Wissen darüber besitzen, wie verschiedenfarbige Lichter physiologisch unterschieden werden.

Nach ihrem Bau sind zwei Gruppen von Sinneszellen bekannt. Es sind dies die Zapfen und die Stäbchen. Erstere kommen in

einem kleinen Bereich an der innersten Netzhautgrube ausschließlich vor und werden zur Netzhautperipherie hin in zunehmendem Maße mit Stäbchen untermischt, bis an den Rändern der Netzhaut nur noch Stäbchen vorkommen.

Über die Funktionsweise dieser Sinneszellen und der anschließenden Ganglien ist Vieles bekannt. Ein großer Teil unserer Kenntnisse auf diesem Gebiet ist elektrophysiologisch durch die Ableitung von Aktionspotentialen sehr kleiner nervöser Einheiten gewonnen worden. So konnte HARTLINE (1938) drei Typen von Reaktionen auf Lichtreize an isolierten Fasern des n. opticus von Fröschen feststellen. GRANIT (1947) zeigte, daß verschiedene nervöse Elemente auf verschiedene Lichter unterschiedlich stark reagieren.

In den letzten Jahren ist besonders über die Existenz von photosensiblen Substanzen Neues bekanntgeworden. Es gelang RUSHTON (1959) erstmalig an der Netzhautgrube in situ die Existenz von zwei Pigmenten nachzuweisen, deren Absorptionsmaxima er mit 540 nm und 590 nm angibt. Wahrscheinlich handelt es sich bei diesen Substanzen um die seit langem vermuteten "Zapfenpigmente".

Physiologischen und morphologischen Befunden lassen sich durchaus verschiedene Leistungen des Sehens zuordnen. Im allgemeinen handelt es sich um Erklärungen, die mit großer Wahrscheinlichkeit zutreffen und im Wesentlichen kaum umstritten sind. Selbstverständlich haben sich auch eine Vielzahl von Hypothesen über das Farbensehen von physiologischen Beobachtungen ausgehend formulieren lassen. Jedoch hat sich bislang keine auch nur annähernd durchsetzen können.

Verf. muß auch bekennen, daß es ihm an Einzelwissen fehlt, um zu vielen Streitfragen überhaupt Stellung nehmen zu können. Wenn man aus eigener Arbeit die Methoden nicht kennt, auf denen viele Befunde beruhen, ist es sehr schwer, Argument gegen Argument abzuwägen. So wird beispielsweise neuerdings eingewandt, daß die "Dominatorkurven" von GRANIT nicht als eigentlich unabhängige Messungen verstanden werden dürften, da sie sich aus der Ableitung von Riesenganglien, in denen eine Vielzahl einzelner Sehelemente geschaltet sind, ergäben. (nach SEGAL 1957) Ob man in einer solchen Einzelfrage

zustimmt oder nicht, entscheidet über ganz wesentliche Unterschiede hinsichtlich der Interpretation solcher Ergebnisse. Es mag deshalb vertretbar sein, auf eine Diskussion solch schwieriger Einzelfragen hier zu verzichten.

Tatsächlich gehen die meisten Theorien des Farbensehens nicht von solchen physiologischen Einzelbeobachtungen aus, sondern von jeweils verschiedenen Phänomenen, die für physiologische Hypothesen besonders zugänglich sind. Theorien des Farbensehens kann man insofern als Lehren über hypothetische Farbrezeptoren bezeichnen. Je nach den Ausgangsdaten ergeben sich auch verschiedene heuristische Grundeinstellungen. Eine wesentliche Rolle spielen hier die Tatsachen der Farbenmischung. Diese stellen nur ein Teilgebiet der zu erklärenden Phänomene dar. Man kann die Theorien des Farbensehens aber, je nachdem ob sie die Phänomene der Farbenmischung zum heuristischen Ausgangspunkt machen oder aber nicht, in zwei große Gruppen teilen. Bezogen auf die Gesetze der Farbenmischung, ergeben sich auf diese Weise zwei unterscheidbare Erklärungsweisen für dieselben.

HELMHOLTZ nahm im Gefolge von Thomas YOUNG die Farbenmischung als wesentlichen Ausgangspunkt für die Erklärung der übrigen Phänomene. HERING hat dies kritisiert und die Gegenthese aufgestellt, daß man die Ergebnisse des Farbenmischens nur aus Tatsachen verstehen könne, die nicht in unmittelbarem Zusammenhang mit diesen selbst stehen. Der berühmte Streit zwischen beiden Forschern ging nicht im Wesentlichen um die Anzahl von Komponenten, die man annehmen müsse, sondern darum, welche spezifischen Phänomene als Ausgangspunkt dienen könnten.

HERINGs Argument z.B. baut darauf auf, daß man aus Farbenmischungen nicht die Natur der wirklichen Grundempfindungen erschließen kann. Es sei ja gerade eine der auffälligsten Gegebenheiten, mit beliebigen Tripeln von Farben ein Gemischsystem herstellen zu können. Es läßt sich deswegen auch nicht entscheiden, welches Tripel die "Urvalenzen" darstellen könnte. Legt man dagegen die Urvalenzen von anderen Tatsachen ausgehend fest, läßt sich das Ergebnis einer jeden Farben-

mischung als "Urvalenzgemisch" verstehen (HERING 1887).

Im Sinne einer solchen Unterscheidung wären alle Autoren von Farbsehtheorien unabhängig davon, wieviele Arten von Rezeptoren und Komponenten sie unterscheiden, entweder der Kategorie zuzuschreiben, für die HELMHOLTZ als Beispiel diente, oder der letztgenannten.

So ging beispielsweise W.S. STILES (1946, 1959) von bestimmten psychophysischen Untersuchungen über Unterschiedsschwellen ("Zweifarbenschwelle") aus und führte mit durch diese Methode isolierten Komponenten den alten Ansatz einer "Linien-Element-Theorie" von HELMHOLTZ (1881, 1882) zu einer sehr viel besseren Annäherung an die Tatsachen, als dies HELMHOLTZ gelungen war. Dieser fruchtbare Ansatz von STILES wurde später von ihm selbst widerrufen, weil er mit seiner Methode inzwischen zu mehr als nur drei Komponenten gelangt war.

Die Ausgangsdaten von STILES sind rein psychophysisch im klassischen Sinn. Gemäß der oben eingeführten Unterscheidung wäre STILES trotz der direkten Anlehnung an HELMHOLTZ eindeutig nach dem von HERING aufgestellten Grundsatz vorgegangen, indem er seine Urvalenz nicht von der Empirie der Farbenmischungen her gewonnen hat, sie aber als Erklärung dafür heranziehen kann. Die von STILES im psychophysischen Verfahren gewonnenen Kurven ergeben annähernd die Eichreizkurven eines Gemischsystems.

HERING hat in seiner Abhandlung über NEWTONs Gesetz der Farbenmischung eindeutig klargemacht, daß jede Annahme von drei bis zu unendlich vielen Komponenten zur Erklärung der Farbenmischungen hinreichen würde. Solche Theorien würden sich lediglich in den geometrischen Eigenschaften ihrer "Urvalenztafeln" unterscheiden. Eine Urvalenztafel ist nichts weiter als ein Gemischsystem, dessen Ausgangswerte durch die wirklichen "Grundempfindungen" dargestellt sind. NEWTONs Farbenkreis wäre beispielsweise eine Urvalenztafel mit unendlich vielen Komponenten. In diesem Sinne kann die Zahl der Komponenten keinen wesentlichen Streitpunkt zwischen Farbsehtheo-

rien abgeben, solange es allein um die Erklärung der Farbenmischungen geht.

HERINGs Argumente drängen alle auf den gleichen Punkt: die Operationen des Farbenmischens erlauben in jedem Fall, eine geometrische Farbtafel aufzustellen, deren Richtigkeit sich empirisch zeigen läßt, aber für eine eigentliche Erklärung des Farbensehens im weiteren Sinne sind sie irrelevant. Trotzdem entnimmt HERING der Empirie des Farbenmischens den Dreifarbensatz als begrenzende Bedingung. Konsequenterweise müßte eine Theorie des Farbensehens das Dreifarbenprinzip aus ihren eigenen Annahmen ableiten können. HERING umgeht dieses Problem, soweit ich sehe, indem er die Gesetze der Farbenmischung als ein physikalisches Prinzip gelten läßt.

Aus diesen Gründen erklärt es sich auch, weshalb HERING, der sich für die Wahl der Grundempfindungen allein auf eine phänomenologische Analyse stützt, GRASSMANN und HELMHOLTZ wegen ihrer psychologischen Ableitung der Gesetze der Farbenmischung kritisiert. Deshalb bemüht HERING sich auch, die Grassmannschen Gesetze durch objektivere Formulierungen zu ersetzen.

HELMHOLTZ hingegen greift den Dreifarbensatz als physiologische Hypothese auf. Daraus folgt unmittelbar, daß die Farbenmischungen keine objektive Relevanz zu haben brauchen (s.oben, S. 60). Stattdessen gibt es für HELMHOLTZ "objektive Grundfarben" in einem anderen Sinne. Es sind dies die Farben, die den von ihm vorausgesetzten Grundempfindungen zuzuordnen sind. Das Problem, wie Farbenmischungen zustande kommen, ist für HELMHOLTZ von vornenerein kein physikalisches, sondern ein physiologisches, das sich durch die Voraussetzung von Grundempfindungen vollständig beherrschen läßt.

Jeder Lichtreiz erregt die hypothetischen Rezeptoren in einem anderen Verhältnis und die Farbwahrnehmung ist durch dieses eindeutig festgelegt. Diese Festlegung gilt nach den gleichen Grundsätzen, die auch sonst für die Farbenmischungen gelten. Wendet man eine solche Hypothese auf den Begriff "Farbreizvalenz" aus der Farbmetrik an, so läßt sich sofort

aussagen, was man darunter zu verstehen hat: es handelt sich um das physiologische Äquivalent für die formale Invariante gegenüber allen möglichen Transformationen des Farbenraumes. Umgekehrt verfügt eine solche physiologische Theorie auf diese Weise durch Implikation über das gesamte formale Inventar der Farbengeometrie.

Der Isomorphismus zwischen den Operationen der Farbenmischung und den unterstellten physiologischen Gegebenheiten ist hier fast schon eine Tautologie, aber insofern ein Übergang von einem Sachgebiet in ein anderes vollzogen wird, kann man den Schluß nicht als zirkulär bezeichnen. Unter dem Gesichtspunkt einer allgemeinen Farbtheorie betrachtet, ließe sich ein glücklicherer Entwurf kaum denken, weil hier Physik, Physiologie und Psychologie einerseits so auseinandergehalten werden, daß sie nicht miteinander in Widerspruch geraten, und andererseits auf einen gemeinsamen Erkenntnisgegenstand hin zusammengefügt sind.

Im strengen Sinne gilt eine solche Theorie aber schon für den engsten Bereich der Farbenmischungen nicht vollständig. Ein homogenes Licht bereits muß als Erregungsgemisch der drei Rezeptoren angesehen werden und nach den Erfahrungen der Farbenmischung sollte sich ein Verlust an Sättigung einstellen. HELMHOLTZ schließt daraus konsequenterweise: "Es folgt nun hieraus, daß es noch eine Reihe von gesättigteren Farbempfindungen geben müsse, als diejenigen sind, welche beim gewöhnlichen Zustand des Auges durch objektives Licht, selbst durch das des Spektrums, hervorgerufen werden." (HELMHOLTZ 1911, S. 121)

Dies führt noch nicht direkt auf einen Widerspruch, denn diese gesättigteren Farben lassen sich durch Umstimmung der Netzhaut tatsächlich erreichen, aber wie man sieht, ist der prinzipielle psychophysische Zusammenhang zwischen Farbenmischung und Farbensehen gewissermaßen schon im einfachsten Fall aufgegeben. Diese Schwierigkeiten verstärken sich fortschreitend, je weiter man sich von den Gegebenheiten der mischbaren

Farben entfernt.

Die Erörterung dieser zwei Typen von Theorien des Farbensehens war unternommen worden, um zu zeigen, daß man, von sehr verschiedenen Voraussetzungen ausgehend, jedenfalls zu dem einen übereinstimmenden Postulat kommt, daß wenigstens drei voneinander unabhängige physiologische Empfänger gegeben sein müssen, um den Erscheinungen der Farbenmischung gerecht werden zu können. Dieses eine Tatsachengebiet belastet also die Physiologie mit einem Anspruch, dem wir bisher nur durch Hypothesen und nicht durch physiologische Beobachtungen gerecht werden konnten.

Es ist dagegen leicht sich vorzustellen, zu welchen Schlüssen man kommen würde, wenn man den Anforderungen der Farbenmischungen mit nur zwei Komponenten gerecht werden könnte. Wahrscheinlich würde man den morphologisch und funktional unterscheidbaren Zapfen und Stäbchen die Rolle der Farbenrezeptoren zuschreiben. Sie werden heute ausschließlich für das Tages- und Dämmerungssehen in Anspruch genommen. Man leitet diese ihre Funktion aus den Messungen über spektrale Empfindlichkeit des Auges bei Hell- und Dunkeladaptation ab. Auch diese "Duplizitätstheorie" ist nicht streng beweisbar und es wird von Vielen bestritten, daß im Übergang von Tages- zu Dämmerungssehen tatsächlich ein Wechsel des Rezeptorsystems stattfindet.

Offenbar hat bislang nur E.N. WILLMER versucht, diesen Weg zu gehen. Dazu war noch ein anderes Hindernis aus dem Weg zu räumen. Die fovea centralis wird als derjenige Bereich auf der Netzhaut angesehen, der für das Farbensehen die besten Bedingungen bietet. Der innerste Bereich dieses Gebietes enthält nur Zäpfchen und im Ganzen ist die fovea im Vergleich zu den peripheren Arealen der Netzhaut in geringerem Maße mit den anderen Sinneselementen, die Stäbchen ausgestattet.

Aus diesem Grunde hat man eine wesentliche Beteiligung der Stäbchen am Farbensehen schon der bloßen Möglichkeit nach bestritten. Stattdessen wird im allgemeinen unterstellt, daß

es drei verschiedene Arten von Zapfen gäbe, die sich nur funktional, aber nicht morphologisch unterschieden. WILLMER (1944, 1945) hat die Farbentüchtigkeit des zentralsten Bereichs der fovea speziell untersucht und gefunden, daß auch dort bestimmte Farben nicht erkannt bzw. verwechselt werden. WILLMER ist der Meinung, daß damit im Prinzip der Weg frei wäre, Stäbchen und Zapfen als Farbrezeptoren in Erwägung zu ziehen.

Neben morphologischen Unterscheidungen nach Rezeptororganen lassen sich auch verschiedene photosensible Substanzen für das Farbensehen als Komponenten nutzbar machen. Durch die schon erwähnte Entdeckung von RUSHTON ist auf diesem Gebiet eine neue Situation entstanden. Aber auch seine Entdeckung bezieht sich dann nur auf zwei Komponenten.

Generell ergibt sich für die Theorie des Farbensehens aus den Untersuchungen von photosensiblen Substanzen ein wesentlicher Vorteil. Erstens ist die Absorption von Licht durch solche Medien ein mit rein physikalischen Methoden darstellbarer Vorgang und zweitens verhalten sich die Absorptionen von Licht durch ein Gemisch von mehreren solcher Substanzen annähernd linear.

Auf dieser Tatsache baut LEGRAND (1959) auf, um die Linearität des Farbraumes zu begründen. Damit wird ein sowohl physiologisches als auch psychologisches Problem aufgegriffen. Aus der Wirkung peripherer Sinnesorgane läßt sich neurologisch nicht verstehen, wie mehrere Prozesse linear zusammenwirken können, da sich Energie, nach dem physikalischen Maß gemessen, gemäß einer anderen Funktion in Erregung umsetzt. Für die psychologische Seite des Problems gilt entsprechend das Weber-Fechnersche Gesetz, welches in bezug auf die linearen Transformationen des Farbraumes erhebliche Schwierigkeiten bereitet. Aber dieser Gedanke von LEGRAND führt im Einzelnen zu sehr komplizierten Erörterungen und sei hier nur erwähnt.

Angesichts der Möglichkeit, photosensible Substanzen als

Rezeptoren anzusehen, läßt sich erwägen, ob die Identifikation von Lichtarten durch ihre Wellenlänge zu ersetzen wäre durch rein energetische Begriffe. Damit würde logisch wie sachlich der Quantenaspekt des Lichtes in den Vordergrund treten. Möglicherweise würden sich dann auch für unsere Auffassungen von physiologischen Komponenten neue Aspekte ergeben.

5. Psychologie

Insofern jedes Sehen mit Wahrnehmungen von Farben verbunden ist und die Farbenmischungen eins der auffälligsten Phänomene des Farbensehens darstellen, könnte man erwarten, zu diesem Problem reichhaltige Literatur zu finden, die besonders vom "psychologischen Standpunkt" aus Stellung bezieht. Dies ist nicht der Fall. Es haben sich zwar Psychologen mit diesem Problem immer wieder beschäftigt, ihre Arbeiten sind jedoch meist nicht von denen zu unterscheiden, die von Physikern oder Physiologen geleistet worden sind.

Ganz allgemein gilt für das Gebiet der Farbentheorie, daß man sich aus den einzelnen Arbeiten nur schwer ein Bild darüber machen kann, welcher Disziplin ein Autor von Haus aus angehört. Betrachtet man beispielsweise die Titel von klassischen Arbeiten wie den von HELMHOLTZ (1892) "Versuch einer erweiterten Anwendung des Fechnerschen Gesetzes im Farbensystem", so würde man einen solchen ohne Zögern zur engsten psychologischen Fachliteratur zählen. Auch heute noch stehen viele Arbeiten zur Farbentheorie in einer Tradition der Naturforschung, die einzelne Disziplinen nicht auf Teilgebiete eines Gegenstandes beschränkte.

Es ist kaum zu bestreiten, daß in der Farbenlehre von sehr vielen psychologischen Sätzen Gebrauch gemacht werden muß. Schwer verständlich ist jedoch, warum diese so häufig durch explizite scheinphysikalische Formulierungen überdeckt werden. Offenbar besteht hier eine Reihe von Schwierigkeiten

in sachlich ungeprüften, aber naheliegenden Vorentscheidungen. Besonders deutlich ließ sich das an dem Beispiel der Farbenmetrik erkennen, deren Autoren auf der einen Seite vielleicht das imponierendste psychophysische Gebäude, das wir gegenwärtig kennen, errichtet haben, sich aber andererseits leidenschaftlich dagegen wehren, daß an ihren Methoden und Messungen etwas im wesentlichen Sinne psychologisch sein könnte.

Eine Wurzel solcher Vorurteile mag man in der überwiegend physikalischen Tradition der Farbenlehre suchen. Fast alle grundlegenden Untersuchungen kommen hier von Physikern. Vielfach sind sie auch ausdrücklich als physikalisch bezeichnet. Allerdings stammen sie dann meist aus einer Zeit, in der man kaum zwischen Psychologie und Physik unterschied, da es überhaupt noch keine eigenen psychologischen Methoden gab. Bezeichnungen tun auch nichts zur Sache, so lange das methodologische Bewußtsein nicht verlorengeht, welche Schlüsse aus einer Operation gezogen werden können und welche nicht.

Eine andere immer wieder zu Mißverständnissen führende Ansicht ist, daß man in der Psychologie nicht messen würde. Hierzu kann man die Vermutung wagen, daß in der gesamten Wissenschaftsgeschichte noch nie das Messen und seine logischen Grundlagen so weitgehend Publikationen und Diskussion einer Disziplin beherrscht haben, wie dies in der Psychologie seit etwa zwei Jahrzehnten der Fall ist. Die logischen Grundlagen des Messens sind natürlich für alle Wissenschaften die gleichen, die Schwierigkeiten, psychologischen Sachverhalten metrische Begriffe zuzuordnen, sind allerdings besonders groß. Dies gilt speziell für die Herstellung von Phänomenskalen, für die es keinen psychophysischen Ansatz gibt. In der Farbenlehre lassen sich dagegen die meisten Relationen in der klassischen Weise als Psychophysik aufbauen.

Ein echter psychophysischer Ansatz bedeutet methodisch gesehen eine Erleichterung, ersetzt aber nicht eine eigene psychologische Meßoperation. Es ist immer notwendig, die

phänomenalen Daten einerseits zu kennzeichnen und andererseits als irgendein "Wieviel" auszudrücken. Im ursprünglichen Sinne ist der Gegenstand der Psychophysik gerade die Beziehung zwischen physikalischen und phänomenalen Gegebenheiten, aber nicht das Eine oder das Andere. Die psychologischen Operationen sind dann nur ein Teil des ganzen Vorganges.

In diesem Sinne treten überall in der Farbenlehre psychologische Sätze oder psychologische Operationen auf, man kann aber nicht sagen, daß die Psychologie sich Aspekte der heutigen Farbentheorie zum eigentlichen Gegenstand gemacht habe. Aus diesem Grunde gibt es auch kaum psychologische Aussagen über Farbenmischungen.

Es kann kein Zweifel darüber bestehen, daß die ganzen Fragen des photometrischen Vergleichs etwa systematisch gesehen in das Gebiet der Wahrnehmungspsychologie gehören würden. Tatsächlich sind hier rein psychologische Probleme im allgemeinen von Physikern behandelt worden. Die Überlegungen von SCHRÖDINGER befassen sich damit, ob ein Beobachter pauschal nach Ähnlichkeiten vergleiche oder ob es ihm möglich sei, einzelne Dimensionen des Farbeneindruckes für den Vergleich auszusondern. Dies sind, wie bereits erwähnt worden war, psychologische Probleme.

Die neuere Psychologie hat von sich aus nur zwei Randgebiete der Farbenlehre aufgesucht. Es sind dies die eigentliche Farbphänomenologie und die Probleme der Farbkonstanz. Beide Gebiete ergeben sich im Zusammenhang mit anderen Problemen, die sich der neueren Psychologie gestellt haben.

Phänomenologie ist allgemein als eine Reaktion auf die ältere Lehre von den Empfindungen als Elementarbestandteilen des Psychischen in den Vordergrund getreten. Ebenso verhält es sich mit den Konstanzerscheinungen, die auf allen Sinnesgebieten zu beobachten sind. Das Interesse der Psychologie richtete sich meist unter dem Einfluß holistischer Tendenzen darauf. Unter solchen Aspekten wurde eine unveränderliche

Zuordnung von bestimmten Reizen zu bestimmten Empfindungen als eine ungenügende Beschreibung der Wirklichkeit angesehen. Folglich trat das Interesse an Invarianten, die sich unter wechselnden Reizbedingungen ausbilden, in den Vordergrund.

Die ältere Phänomenologie begnügte sich im allgemeinen mit dem Sammeln und Klassifizieren von Phänomenen. Dies gilt auch für die klassischen Untersuchungen zur Farbphänomenologie, die bald nach der Jahrhundertwende entstanden sind. Inzwischen ist man dazu übergegangen, durch phänomenologische Analysen, die sich komplizierter experimenteller und formaler Hilfsmittel bedienen, die Bedingungsstrukturen der Phänomene durchsichtig zu machen.

Untersuchungen über phänomenale Kausalität, das räumliche Sehen u.a. sind Beispiele dafür. Man beschreibt nicht mehr, sondern man versucht, die einzelnen Bedingungen vollständig und allgemein darzustellen. Im Sinne einer solchen Analyse ließen sich für Farben etwa die schon vorher erwähnten Untersuchungen von H. HELSON verstehen. Hier werden die Wahrnehmungsbedingungen, unter denen gewisse Farben erscheinen, systematisch abgewandelt, und es ist HELSON gelungen, z.B. das Auftreten des achromatischen Punktes oder des "Adaptationsniveaus" durch eine Formel auszudrücken, also formal und allgemein zu fassen. Diese Untersuchungen sind ein Beitrag zur Genese von Farbwahrnehmungen und haben damit einen Bezug zu den Farbenmischungen, denn auch diese sind ein System von Aussagen über das Entstehen von Farbwahrnehmungen.

Mit den Farbenmischgesetzen ist aber noch mehr gegeben. Dies sei an einigen Schritten von einem Beispiel aus der Stereoskopie her entwickelt. Der vornehmste Gegenstand stereoskopischer Untersuchungen ist das räumliche Sehen. Eine Bedingungsanalyse des Phänomens "Tiefe" wird immer davon ausgehen, daß aus einem Bild, welches dem linken Auge und einem zweiten, welches dem rechten Auge dargeboten wird, etwas Neues entsteht, das sich an keinem der beiden einzeln betrachteten Bilder vorfindet, nämlich das Erlebnis räumlicher Tiefe.

Nun kann man auch Farben Stereoskopisch betrachten. Wenn z.B. das linke Auge allein Rot und das rechte allein Grün sieht, so geschieht bei binokularer Betrachtung ebenfalls etwas Neues: beide Farbeneindrücke verschmelzen und es stellt sich eine von beiden einzelnen Farben verschiedene Farbe ein, die für das eben genannte Beispiel gelb aussehen würde.

Zum Teil enthält dieser Vorgang das gleiche wie eine Farbenmischung und erstaunlicherweise sind sogar die Ergebnisse ähnlich und vergleichbar. Wenn nämlich im Farbenmischapparat zwei Lichter gemischt ein bestimmtes drittes ergeben, so kann man erwarten, daß die Verschmelzung der beiden Farben bei stereoskopischer Betrachtung die gleiche dritte Farbe ergibt. Nun sieht man aber, daß uns bei der Farbenmischung nicht vor allem interessiert, wie eine Verschmelzung von zwei verschiedenen Wahrnehmungen eine neue ergibt, sondern welche Farbe neu entsteht.

Diese Frage läßt sich beantworten, weil wir über einen Farbenraum verfügen, der es uns erlaubt, durch eine einfache geometrische Operation diese neue Farbe zu finden und allgemein ihr Erscheinen vorherzusagen. Während das Phänomen "Tiefe" ein Ereignis im konkret ausgebreiteten Wahrnehmungsraum ist, stellt das Finden oder die Vorhersage einer neuen Farbe einen Vorgang in einem konstruierten Eigenschaftsraum dar.

Um die Farbenmischungen durch einen Wechsel der Perspektive einmal als psychologisches Problem in den Griff zu bekommen, könnte man sich vorstellen, die Farbenmischgesetze seien noch nicht bekannt. Als Phänomen der Wahrnehmung sei jedoch gegeben, daß Farben, die gleichzeitig am gleichen Ort auftreten, zu einer neuen Farbe verschmölzen und daß diese neuen Farben je nach der Qualität der gleichzeitig vorhandenen Farben anders aussähen. Es wäre jetzt zweifellos ein sinnvolles psychologisches Unterfangen, nach einer Regel oder einem Gesetzt zu suchen, das diese Veränderungen des Farbeindruckes beschreibt. Es würde der Psychologie nicht an Methoden fehlen, diese Frage anzugehen. Die Probleme, die dabei auftreten,

sollen hier gerade nicht erörtert werden, weil dies von dem eigentlichen Gegenstand der Untersuchung fortführen würde.

Jedenfalls würde man versuchen, die Farben in eine Ordnung zu bringen und trotz vieler denkbarer Ergebnisse wäre es am wahrscheinlichsten, daß eine solche entsteht, die in Gestalt des Farbraumes schon existiert. Diese Vermutung ergibt sich aus der psychologisch sinnvollen Anordnung der Farben in einem Gemischsystem. Dies war schon aus den Erörterungen des II. Kapitels hervorgegangen. Jede Skalierung von Farben nach Ähnlichkeit müßte zu einer topologisch gleichen Farbfolge führen, wie sie sich auch auf einer Farbtafel findet, die man als einen Schnitt durch den Farbenraum auffassen kann. Die Untersuchungen von R.E. WEBER (1954) zeigen, wie schon erwähnt, daß bereits Kinder von vier Jahren imstande sind, einen Farbenkreis nach der Ähnlichkeitsfolge der einzelnen Farben in annähernd richtiger Weise anzuordnen.

Psychometrisch gesehen würde sich unabhängig von der verwendeten Methode die Aufgabe stellen, ein Farbsystem so anzuordnen, daß es linear wäre. Das ist bei mehrdimensionalen Systemen nicht einfach zu erreichen, es ist im Prinzip aber möglich. Die Axiome, denen die Beziehungen zwischen den einzelnen Farborten und diesem System genügen müßten, wären mit den Grassmannschen Gesetzen oder besser den formalen Explikationen dazu identisch oder verwandt.

Natürlich müßte die Operation des eigentlichen Mischens durch eine andere ersetzt werden. ARENS (1951) erwähnt anläßlich einer Erörterung der Möglichkeit einer "empfindungsgemäßen Farbmetrik", daß man zwischen zwei Farben immer eine "mittlere" finden könne. Er entwirft auf diese Weise ein Verfahren, das hier nicht weiter beschrieben zu werden braucht. Das Aufsuchen einer Mitte spielt tatsächlich in der psychologischen Skalierungstechnik eine bedeutsame Rolle, (vergl. dazu S.S. STEVENS und E.H. GALANTER, 1957; W. WITTE, 1960) und es bildet die Mischoperation in formaler Hinsicht fast vollständig ab; denn ein Gemisch von zwei Farben liegt im Farbraum

immer zwischen diesen Farben. Wenn beispielsweise ein auf Mittelungen aufgebautes System gewisse Voraussetzungen erfüllt, so läßt sich aus formalen Gründen zeigen, daß es auch linear ist (J. PFANZAGL 1959). Im Prinzip lassen sich alle linearen Systeme durch Transformation ineinander überführen, also auch ein nach formal ähnlichen Regeln aufgebautes psychologisches System und ein Gemischsystem.

Zum Problem der "empfindungsgemäßen" Farbmetrik muß noch angemerkt werden, daß die Bedingungen für Linearität nicht notwendig eine überall gleichmäßige Gleichabständigkeit der Farborte im Sinne der Unterschiedsschwelle etwa zu implizieren braucht. Man kann bei einer Betrachtung der Schwellenwertkurve einerseits und der Lage der Komplementärfarben andererseits leicht feststellen, daß Gleichabständigkeit der Farborte und polare Lage der Gegenfarben in Bezug auf einen gemeinsamen Mittelpunkt Bedingungen sind, die sich nicht gleichzeitig erfüllen lassen. Insofern würde jede Methode, die auf Schwellenmaßen direkt aufgebaut ist, nicht zu einer Abbildung des Farbraumes führen können.

Der Sache nach bringen alle diese Überlegungen nichts, was nicht schon im Zusammenhang des II. Kapitels erörtert worden war. Hier ist nur der Gesichtspunkt insofern verändert, als die Herstellung eines Farbsystems erwogen worden war, die sich nicht der Farbenmischungen bedienen sollte. Andererseits muß aber gesagt werden, daß man das Farbenmischen ohne jede Einschränkung als ein psychologisches Experiment bezeichnen kann. Wenn dies im allgemeinen trotzdem nicht gebräuchlich ist, so erklärt sich dies aus der geschichtlichen Entwicklung des ganzen Wissensgebietes. Daraus ist aber auch verständlich, warum die Psychologie sich so wenig mit diesen Gegenständen befaßt hat: sie hat im großen und ganzen die wesentlichen Probleme schon gelöst vorgefunden, als sie mit eigenen Ansprüchen und hinreichenden Methoden eine Lösung hätte versuchen können.

Wenn die Psychologie heute über Methoden verfügt, das Farben-

system nachzubilden, so ist damit nicht gesagt, daß sie auch über theoretische Vorstellungen und Modelle verfügt, ein solches System durch eine Theorie zu begründen. Die Psychologie ist gegenwärtig zwar reich an Methoden, aber arm an zusammenfassenden Theorien. Was Farbenmischungen sind und warum sie die bekannten Eigenschaften zeigen, läßt sich aus allgemeinen psychologischen Grundsätzen genauso wenig ableiten wie aus physikalischen oder physiologischen.

Zusammenfassung

In dem vorangegangenen Kapitel sind verschiedene Sachgebiete, die in systematischer oder praktischer Hinsicht mit Farbensehen und Farbenmischungen verbunden sind, daraufhin untersucht worden, ob sie theoretisch oder sachlich Begründungen für diese bereithaben, die über die vorher dargelegten formalen Regeln hinausgehen.

Im Hinblick auf die Physik war festgestellt worden, daß die Farbenmischungen nicht in dem gleichen Sinne ein Gegenstand der physikalischen Optik sein können wie andere Erscheinungen des Lichts. Soweit in physikalischen Zusammenhängen überhaupt von Farben die Rede ist, handelt es sich um einen Namen für Vorgänge, die eindeutig durch physikalische Modelle erklärbar und aus physikalischen Gründen definierbar sind.

Bei der Besprechung der Photometrie und Kolorimetrie hatte sich ergeben, daß ihre Bemühungen nicht nur prinzipiell psychophysisch sind, weil Licht und Farbe als Wahrnehmungen ihren Gegenstand ausmachen, sondern daß auch alle metrischen Operationen logisch nicht denkbar sind ohne einen Beobachter.

Anhand der Photometrie war deutlich geworden, daß nahezu alle ihre Probleme mit den Eigentümlichkeiten von Licht und Farbe als Phänomenen verknüpft sind. Physikalische Schwierigkeiten treten im Vergleich dazu kaum auf.

Es war speziell die Rolle des Beobachters in der Farbenmetrik besprochen worden. In dieser Disziplin wird besonderer Wert

auf die Feststellung gelegt, daß nur der Farbreiz gemessen würde und gerade nicht die Empfindung. Die Funktion des Beobachters soll auf das Anlegen von Maßstäben beschränkt sein, die Maßstäbe seien rein physikalischer Natur. Es entsteht der Eindruck, die Linearität aller Beziehungen im Farbraum beispielsweise sei ein Ergebnis eben dieser im wesentlichen physikalischen Maßstäbe. Solchen Ansichten wurde entgegengesetzt, daß die Urteile des Beobachters zwar auf physikalische Maßstäbe abgebildet werden können, daß diese sich aber nicht aus physikalischen Gründen verknüpfen ließen. Die Verknüpfung von drei Intensitätsdimensionen, die erst den geometrischen Ort einer Farbe als Gemisch definiert, ist nur aufgrund des Urteils eines Beobachters möglich.

Zur physiologischen Forschung ließ sich nur feststellen, daß wir kein gesichertes Wissen über das Zustandekommen der Farbwahrnehmung besitzen.

Physiologische Theorien des Farbsehens gehen entweder von den Daten der Farbenmischung aus und machen diese gleichzeitig zu einer physiologischen Hypothese oder aber sie nehmen ihren heuristischen Ausgang von anderen Farbphänomenen her und versuchen, die Gegebenheiten der Farbenmischungen daraus zu erklären.

Als Beispiel für diese verschiedenen Wege waren die Theorien von YOUNG-HELMHOLTZ einerseits und HERING andererseits herangezogen worden. Im ersten Fall folgt zwar eine Begründung theoretischer Art sowohl für die Farbenmischungen allgemein als auch für den Dreifarbensatz speziell, aber eine Bestätigung wäre nur gegeben, wenn die von der Theorie geforderten physiologischen Voraussetzungen nachweisbar wären. HERING verzichtet der Sache nach auf eine Begründung des Dreifarbensatzes, indem er ihn als eine "objektive", das soll heißen außerphysiologische Gegebenheit hinnimmt.

Die Psychologie hat sich als Disziplin mit den Problemen der Farbenmischungen wenig befaßt. Es bestehen keine Gründe, die

Untersuchung der Beobachtungsbedingungen beim photometrischen Vergleich und auch die Operationen der Farbenmischungen als Gegenstände der Wahrnehmungspsychologie auszuschließen. Ebenso gibt es Methoden, die es erlauben würden, Systeme von der formalen Struktur des Farbraumes herzustellen, ohne die eigentlichen Farbenmischungen in Anspruch zu nehmen. Über theoretische Vorstellungen, aus denen Wesen und Verhalten der Farbmischungen folgen würden, verfügt die Psychologie nicht

Schlußbetrachtungen

Wenn man in der gegenwärtigen Situation von "Farbtheorie" spricht, so kann dies nur einen beschränkten Sinn haben, wie die vorausgegangenen Untersuchungen zeigen sollten. Wir verfügen tatsächlich nur über einen Bestand an Regeln, der es uns erlaubt, gewisse Operationen, die wir als Farbenmischung bezeichnen, sinnvoll und in einem begrenzten Rahmen von Beobachtungsbedingungen mit vorhersagbarem Ergebnis durchzuführen.

Von den verschiedenen Sachgebieten, in die Farben als Gegenstand Eingang finden, ist keines in der Lage, eine Farbtheorie in dem Sinne aufzustellen, daß die Regeln der Farbmischung aus einem Modell oder bestimmten sachlichen Aussagen folgen würden. Solche wären auf jedem der umfassenden Wissensgebiete Physik, Physiologie und Psychologie denkbar.

Es ist nicht einfach zu entscheiden, ob eine Lösung auf einem einzelnen Gebiet solche auf den anderen erleichtern oder gar implizieren würde. Am einfachsten zu durchschauen wäre der Fall einer physikalischen Lösung. Wenn man einmal annimmt, daß sich aus physikalischen Gründen für jede beliebige Farbe anstelle eines Ausdruckes mit drei Variablen ein solcher mit nur einer ergeben würde, wäre das Problem der eigentlichen Mischung für Physiologie und Psychologie aus der Welt geschafft. In der Physiologie wäre man der Notwendigkeit entbunden, nach drei oder mehr Rezeptoren zu suchen und für die

Psychologie ergäbe sich eine "Normalzuordnung" von Reiz und Empfindung in der gleichen einfachen Weise, wie dies auf anderen Sinnesgebieten, beispielsweise der Akustik, der Fall ist.

Die bei den Mischoperationen auftretenden farbigen Erscheinungen wären genauso aus physikalischen Gründen definierbar wie etwa Interferenz oder Beugung, für die es zwar sinnlich wahrnehmbare Äquivalente gibt, die aber weder eine Vorbedingung für die physikalische Darstellbarkeit abgeben noch in einem notwendigen Zusammenhang mit diesen physikalischen Ereignissen stehen.

Weiter könnte man sich denken, daß die skizzierte physikalische Lösung vergleichbare auf den übrigen Gebieten nach sich zöge. Die physiologischen Vorgänge wären zwar durch physikalische Ereignisse in Gang gesetzt, aber es wäre in dem hier angenommenen Falle möglich, daß sich eine vollständige Reihe von nervösen Prozessen beobachten ließe, die eindeutig den Leistungen des Farbensehens zuzuordnen wäre. Dieses selbst sei in einer wieder andersartigen Beobachtungsreihe, die sich auf Erlebnisse bezieht, also als ein psychologischer Gegenstand darstellbar.

Wenn man unter solchen Umständen von einer Farbentheorie sprechen würde, könnte man dies in einem Sinne meinen, der drei in sich vollständige Lösungen als komplementäre Aspekte vereinigt, Kein Aspekt wäre auf den anderen vollständig zurückzuführen, aber alle würden durch einen gemeinsamen Gegenstand zusammengehalten. Das Problem der Identität eines Gegenstandes bei solcher Betrachtung sei hier allerdings unberührt gelassen.

Gleichermaßen ließen sich aber auch die zusammengefaßten Ergebnisse jedes der drei Sachgebiete als physikalische, physiologische und psychologische Farbentheorie bezeichnen. Wenn man jetzt aber davon ausgeht, daß nur eine Disziplin zu einer verhältnismäßig abgeschlossenen Lösung durchdringt, so ergeben sich jeweils verschiedene Situationen für die

Übrigen.

Man denke sich den Fall, es käme zu einer vollständigen Lösung auf psychologischem Gebiet, die das Verhalten von Farben in Mischungen beispielsweise aus einer allgemeinen Theorie der Eigenschaften ableiten könnte. Nach dieser wäre etwa das Zustandekommen eines Farbeindruckes in der gleichen Art und Weise zu behandeln wie das eines ästhetischen Urteils; wobei in einem solchen Fall natürlich auch die ganze Geometrie des Farbraumes aus der gleichen Theorie folgen müßte. Eine solche Lösung hätte für die Physiologie möglicherweise die Konsequenz, sich heuristisch gar nicht mehr auf ein Verständnis der Farbenmischung durch Prozesse auf der Retina einstellen zu müssen. Ob eine psychologische Lösung, unter sehr allgemeinem Gesichtspunkt betrachtet, auch auf physikalische Vorstellungen rückwirken könnte, ist allerdings unwahrscheinlich, sei hier aber aus prinzipiellen Gründen offengelassen.

Dagegen hätte eine physiologische Lösung, die den eindeutigen Fall hervorbringen könnte, daß in dem Gebiet der Retina bereits die Verschmelzung von drei Erregungen zu einem homogenen Prozeß stattfindet, für die Psychologie den Gewinn einer Normalzuordnung einer jeweils einfachen "Farbreizvalenz" zu einer Empfindung. Komplizierte Annahmen über das Zustandekommen von Farbeindrücken wären nicht nötig und angesichts von Abweichungen, wie sie dann etwa das LANDsche Phänomen darstellten, wäre wenigstens eine einwandfreie Ausgangssituation vorhanden.

Keine von diesen Möglichkeiten existiert bislang. Wirklich gegeben sind einerseits die Tatbestände und das sehr allgemeine Wissen, daß physikalische, physiologische und psychologische Prozesse involviert sind. Ohne den Gegenstand "Farbe" theoretisch zu verstehen, führen wir sehr unterschiedliche Beobachtungen und Operationen in bezug auf ihn aus.

An die Stelle einer theoretischen Begründung sind die empirischen Daten der Farbenmischung und im besonderen der Dreifarbensatz als umfassendes heuristisches Prinzip getreten.

Seltsam daran ist, daß sich ein solches Datum nicht als Folge eines allgemeineren Zusammenhanges ergibt, sondern lediglich unter verschiedenen Hypothesen zu einem physiologischen oder physikalischen Faktum erhoben wird.

Auf diese Weise wird unter sachlich verschiedenen Aspekten gerade dasjenige als Axiom vorausgesetzt, dessen Erklärung vielleicht die natürlichste Voraussetzung zu weiteren Erkenntnissen darstellen würde. Es war naheliegend und für eine zurückliegende Erkenntnissituation auch fruchtbar, die Farbenmischung und den Dreifarbensatz als erklärendes Modell einzuführen.

Wenn man bedenkt, daß die Gesetze, nach denen wir Farbenmischungen rational handhaben können, etwa 150 Jahre alt sind, und die heute noch einflußreichsten Hypothesen seit mehr als 100 Jahren in fast unveränderter Form bestehen, so wird man fragen, weshalb sich kein echter Fortschritt ergeben hat. Die Physik des Lichtes hat sich in diesem Zeitraum vollständig verändert, ohne daß diese Entwicklung sich irgendwie für die Farbenlehre ausgewirkt hat. Hermann von HELMHOLTZ hätte wohl mit Sicherheit erwartet, seine Theorie direkt nachweisen zu können, wenn die gegenwärtigen elektrophysiologischen Methoden vorauszusehen gewesen wären.

Ein Problem für sich ist, wieso die Farbenmischungen als Tatsachengebiet keine eigentliche Entwicklung erfahren haben. Die meisten Tatsachen, die heute bekannt sind, waren auch damals schon bekannt. Vergleichbares gilt auch für andere farbige Erscheinungen wie Nachbilder, simultaner Kontrast u.a. Über diese Dinge kann man beispielsweise bei Thomas YOUNG in der 1807 erstmalig veröffentlichten Vorlesung "Über das Sehen" im wesentlichen das Gleiche lesen, was sich auch heute noch in Lehrbüchern findet (YOUNG 1845).

Es kann nicht bestritten werden, daß es neue Ansätze z.B. quantenphysikalischer Art gibt. Aber diese scheinen von Anbeginn bereits in das Fahrwasser einer Dreikomponenten-Fragestellung zu geraten. Fast die gesamte moderne Physiologie,

soweit sie sich mit Problemen des Farbensehens beschäftigt, sucht nach Komponenten, wie es das Modell der Farbenmischung fordert. Es wäre mindestens denkbar, daß man, ohne ein "trichromatisches Auge" vorauszusetzen, die wirklich erreichbaren Ergebnisse für andere Vorstellungen über das Zustandekommen des Farbensehens fruchtbar machen könnte.

Eine besonders bemerkenswerte Folge davon, die Farbenmischungen als erklärendes Prinzip zu kanonisieren, ist, daß dadurch tatsächlich ihrer eigenen Weiterentwicklung ein Riegel vorgeschoben worden ist. Indem man nämlich versucht, die Farbenmischoperationen so genau wie möglich zu fassen, geht man experimentell wie theoretisch isolierend vor. Aus diesem Grunde ist so wenig über das Verhalten von Mischungen unter verschiedenen Beobachtungsbedingungen bekannt. Man beschränkt sich auf die Untersuchung eines bestimmten Falles und verhindert, daß verschiedene Tatsachenbereiche neue Verbindungen eingehen. Auf diese Weise hat sich die Situation erhärtet, daß Farbenmischungen einerseits und die übrigen Erscheinungen des Farbensehens andererseits kaum miteinander in Beziehung gebracht werden.

Die Reaktion auf das LANDsche Phänomen ist hierfür in jeder Hinsicht ein gutes Beispiel. Man hat es nicht als eine wirkliche Frage und einen Beitrag zur Erweiterung unserer Kenntnisse über Farbenmischungen verstanden, sondern sich vielmehr von vornherein um den Nachweis bemüht, daß diese davon unberührt blieben. Vielfach wird gar nicht bemerkt, daß eine solche Feststellung sinnlos ist oder aber bedeutet, daß man die Farbenmischung als theoretisches Prinzip vorausgesetzt hat. In Wirklichkeit ist überhaupt nicht entscheidbar, in welcher Beziehung dieses Phänomen zu den Farbenmischungen steht.

Gegen die GRASSMANNschen Gesetze verstößt die Bedingungsstruktur des LANDschen Phänomens nicht, insoweit diese eine zuverlässige Festlegung eines Farbortes durch das Aussehen einer Farbe unabhängig von ihrer Zusammensetzung als Farb-

reiz verlangen. Eine solche Bedingung ist durch die Invarianz der Farborte gegenüber wechselnden Reizgrößen erfüllt. Die empfindungsgemäßen Merkmale einer Farbe sind natürlich auch bei den Farben gegeben, die im LANDschen Phänomen auftreten. Bislang bleibt jedoch unentscheidbar, ob das Farbortesystem von LAND die gleichen Markmale aufweist wie ein Ortesystem, das sich aus Mischungen ergibt.

Diese Frage ist nur durch Aussagen zu beantworten, die von den eigentlichen Farbenmischungen unabhängig sind. Wie im I. Kapitel gezeigt worden war, tritt je nach den Wahrnehmungsbedingungen entweder eine Farbe gemäß der aus den Mischregeln abgeleiteten Voraussagen auf oder nach denen des LANDschen Phänomens. Beide Voraussagen lassen sich nicht aufeinander zurückführen.

Wenn künftige Untersuchungen erhärten sollten, daß sich die neuen Erscheinungen des LANDschen Phänomens nicht auf die alten der Farbenmischungen zurückführen lassen, so ist dies gleichbedeutend mit einem vollständigen Aufhören der theoretischen Vorstellungen, mit denen wir uns bislang beholfen haben. Es zeigt sich nämlich jetzt in großer Deutlichkeit, daß wir angesichts der formalen Beherrschbarkeit der Farbenmischungen die theoretische Inhaltlosigkeit ihrer Regeln übersehen haben.

Literaturverzeichnis

Arens, H.,	Farbenmetrik. Berlin 1951.
Bouma, P.J.,	Farbe und Farbwahrnehmung. Eindhoven 1951.
Graham, C.H.,	Color Theory. In: Koch, S., Psychology: A Study of a Science, Vol. I. New York 1959.
Granit, R.,	Sensory mechanisms of the retina. London 1947.
Grassmann, H.,	Zur Theorie der Farbenmischung. Poggendorffs Annalen 89, 1853.
Hartline, H.K.,	The response of single optic nerve fibers of the vertebrate eye to illumination of the retina. Amer.J.Phys. 121, 1938.
Helmholtz, H.L.F. von	Über die Theorie der zusammengesetzten Farben. Poggendorffs Annalen 87, 1852.
---	Versuch einer erweiterten Anwendung des Fechnerschen Gesetzes im Farbensystem. Z. Psychol. Physiol. Sinnesorg. 2, 1891.
---	Versuch, das psychophysische Gesetz auf die Farbenunterschiede trichromatischer Augen anzuwenden. Z. Psychol.Physiol. Sinnesorg. 3, 1892.
---	Handbuch der physiologischen Optik, 3. Aufl. Bd. II. Hamburg 1911.
Helson, H.,	Fundamental problems in color vision. The principle governing changes in hue saturation, and lightness of nonselective samples in chromatic illumination. J. exp.Ps. 23, 1938.

Hering, E., Zur Lehre vom Lichtsinne. Grundzüge einer Theorie des Farbensinnes. In: E. Hering, Wissenschaftliche Abhandlungen Bd. II, herausgg. v.d. Sächs.Akad.d. Wiss. zu Leipzig, 1931. Erstmals 1875.

--- Über Newtons Gesetz der Farbenmischung. Daselbst. Erstmals 1887.

Judd, D.B., Radical changes in photometry and colorimetry fore shadowed by CIE actions in Zürich. J. opt.Soc.Amer. 45, 1955.

Land, E.H., a Color vision and the natural image, Part I. Proc. N.A.S. 45, 1959.

--- b Color vision and the natural image, Part II. Proc. N.A.S. 45, 1959.

--- c Experiments in color vision. Scientific American 1959.

LeGrand, Y., About theories of color vision. Proc. N.A.S. 45, 1959.

Newton, J., Optik, I. Buch. Übers. u. herausgg. v. W.Abendroth. In: Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften Nr. 96, Leipzig 1898. Erstmals 1704.

Pfanzagl, J., Die axiomatischen Grundlagen einer allgemeinen Theorie des Messens. Würzburg 1959.

Richter, M., Grundriss der Farbenlehre der Gegenwart. Dresden 1940.

Rushton, W.A.H., Visual pigments in the intact human eye. Proc. N.A.S. 45, 1959.

Schrödinger, E., Grundlinien einer Theorie der Farbenmetrik im Tagessehen. Ann. Physik. 63, 1920.

Segal, J., Mechanismus des Farbensehens. Jena 1957.

Stevens, S.S. und E.H. Galanter, Ration scales and category scales for a dozen perceptual continua. Journal of Exp. Psychol., 54, 1957.

Stiles, W.S. A modified Helmholtz line-element in brightness-color space. Proc. phys.Soc. 58, 1946.

--- The approach through increment-threshold sensitivity. Proc. N.A.S., 45, 1959.

Walls, G.L., Land! Land! Psych. Bull., 57, 1960.

Weber, R.E., Die Differenziertheit des Ähnlichkeitserlebens von bunten Vollfarben bei Kindern im Alter von 4 - 14 Jahren. Zulassungsarbeit Tübingen 1954.

Witte, W., Über Phänomenskalen. Psychol. Beiträge 4, 1960.

Young, Th., A course of lectures on natural philosophy and the mechanical arts. Vol. I., Lecture 38; On vision. London 1845.

L e b e n s l a u f

Am 18.September 1927 wurde ich als Sohn des Kaufmanns Georg Strüber und seiner Ehefrau Charlotte in Mexico-City geboren.

Die Volksschule besuchte ich von 1934 bis 1936 in Barcelona/Spanien und von 1936 bis 1938 in Hamburg.

Im Jahre 1938 trat ich in die Gelehrtenschule des Johanneums zu Hamburg ein, die ich 1947 mit dem Abitur verließ.

Im Herbst 1944 wurde ich zum Arbeitsdienst und anschließend zum Wehrdienst eingezogen.

Im Sommersemester 1948 begann ich das Studium der Psychologie an der Universität Hamburg. Nach dem Vordiplom ging ich 1953 an die Universität Heidelberg, um mich besonders dem Studium der experimentellen Psychologie zuzuwenden. Von dort folgte ich Herrn Professor Witte an die Universität Tübingen.

In Tübingen habe ich an der Herausgabe des Psychologischen Wörterbuches mit Herrn Professor Dorsch zusammengearbeitet und war einige Jahre am Psychologischen Institut studentische Hilfskraft.